

SCHAUM'S
ouTlines

全美经典 学习指导系列

2000工程热力学学习题精解

[美] P. E. 李雷 著

黄晓琴 归柯庭 张玉萍 戴亚飞 译

2000余道精选题目，内容丰富的题库

逐步的解题过程易于理解

涵盖本课程的全部内容

获取好成绩的帮手



科学出版社



麦格劳-希尔教育出版集团

(0-1561.0101)

责任编辑: 廖得平

全球销量
超越 3000 万
的

SCHAUM'S
ouTlines

“全美经典学习指导系列” 是您的最佳 学习伴侣!



40年来最畅销的教辅系列

全美著名高校资深教授倾力之作

国内重点高校任课教师全力推荐并担当翻译

省时高效的学习辅导, 全面详细的习题解答

迄今为止国内最全面的教辅系列

覆盖大学理工科专业

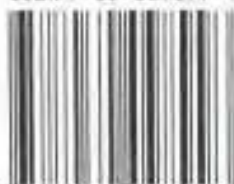
全美经典学习指导系列

- | | | |
|-----------------|----------------|----------|
| 概率与统计 | 2000工程热力学学习题精解 | 电气工程基础 |
| 统计学 | 工程力学 | 工程电磁场基础 |
| 离散数学 | 3000物理习题精解 | 数字信号处理 |
| Mathematica使用指南 | 流体动力学 | 数字系统导论 |
| 数理金融引论 | 物理学基础 | 数字原理 |
| 机械振动 | 材料力学 | 电机与机电学 |
| 微分方程 | 2000离散数学学习题精解 | 基本电路分析 |
| 统计学原理 (上) | 工程热力学 | 信号与系统 |
| 统计学原理 (下) | 数值分析 | 微生物学 |
| 微积分 | 量子力学 | 生物化学 |
| 静力学与材料力学 | 有机化学习题精解 | 生物学 |
| 有限元分析 | 3000化学习题精解 | 分子和细胞生物学 |
| 传热学 | 大学化学习题精解 | 人体解剖与生理学 |
| 近代物理学 | 电路 | |

<http://www.usa-schaum.com>

<http://www.mheducation.com>

ISBN 7-03-009899-4



9 787030 098993 >

Mc
Graw
Hill

ISBN 7-03-009899-4 / O · 1561

定价: 38.00 元

全美经典学习指导系列

2000 工程热力学学习题精解

〔美〕P. E. 李 雷 著

黄晓琴 归柯庭 张玉萍 戴亚飞 译

科学出版社

麦格劳-希尔教育出版集团

2002

内 容 简 介

本书列出了工程力学与热力学中的 2000 道典型习题,并给予了详细的解答,对学生掌握相关的基本概念、提高解题能力很有帮助。

本书适合于工科大学学生。

Peter E. Liley, 2000 Solved Problems in Mechanical Engineering Thermodynamics

ISBN: 0-07-037863-0

Copyright © 1989 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Authorized translation from the English language edition published by McGraw-Hill Companies, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由科学出版社和美国麦格劳-希尔教育出版集团合作出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售。

图字:01-2001-4494 号

图书在版编目(CIP)数据

2000 工程热力学学习题精解/(美)P. E. 李雷(Liley)著;黄晓琴等译.
—北京:科学出版社,2002

(全美经典学习指导系列)

ISBN 7-03-009899-4

I. 2… II. ①李…②黄… III. 工程热力学-高等学校-解题
IV. TK123.44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 082852 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

x

2002 年 3 月第 一 版 开本:A4(890×1240)

2002 年 3 月第一次印刷 印张:26 1/4

印数:1—5 000 字数:765 000

定价: 38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

目 录

第一章 基本概念	(1)
压强/体积/温度/质量/质量流量/容积/速度/重力加速度/功和能	
第二章 流体的热学性质 理想气体	(8)
理想气体过程/真实流体过程/单相和两相过程/表列数据的获取/干度/压缩系数/临界点/等压比热/汽化焓/溶解焓/升华焓/熵的变化/气体常数(纯净气体)/气体常数(混合气体)/蒸汽表的使用/理想气体方程/ Tds 方程/综合题	
第三章 封闭系统的热力学第一定律和第二定律	(58)
热力学第一定律/体积功/叶轮功/弹力功/电功/焦耳定律/混合/热源和功源/不可压缩物质/热力学第二定律/熵增加原理/热传导/综合题	
第四章 真实流体	(91)
归一化的压缩系数图/临界点/麦克斯韦关系/克劳修斯-克拉珀龙方程/焦耳-汤姆孙系数/潜热方程推导/普适的热力学方程/位力膨胀/相变/综合题	
第五章 稳定流动和不稳定流动	(130)
连续性方程/稳定流动的能量方程/亚音速喷管流动/节流热量计/分离和节流热量计/不可压缩流体/亚音速扩散管/涡轮机/压缩机/热交换器;流体混合/接入质量和能量守恒/熵产/不稳定流动/各种小题	
第六章 卡诺循环	(165)
空气卡诺循环/卡诺热泵/卡诺致冷机/氟里昂卡诺致冷机/氟里昂卡诺热泵/氟里昂卡诺热机/水卡诺致冷机/水卡诺热泵/水卡诺热机/重叠卡诺致冷机/重叠卡诺热泵/重叠卡诺热机/卡诺热机驱动卡诺致冷机/克劳修斯不等式	
第七章 气体循环	(184)
iPa 循环/ iVa 循环/勒诺(Lenoir)循环; iPa 和 iVa 循环/奥托(Otto)循环/狄塞尔(Diesel)循环/萨巴提-特雷克(Sabatier-Trinkler)混合循环/阿丁森(Atkinson)循环/ $A-L-A-L$ 循环/混杂循环/开放系统;布雷顿(Brayton)和斯特令(Stirling)循环	
第八章 蒸汽循环	(232)
第九章 湿度测量	(253)
基本注释/简单加热或冷却/加热和加湿/蒸发冷却/冷却塔/再加热去湿/加热或冷却/绝热混合/范宁(Fanning)相互作用功/空气调节/呼吸	
第十章 制冷	(279)
卡诺(Carnot)制冷机/布雷顿(Brayton)制冷机/蒸汽制冷循环/空气液化/重叠循环	
第十一章 燃烧:第一定律和方程平衡	(297)
燃烧方程/奥赛特(Orsat)分析/生成焓/第一定律/高热值与低热值/等容燃烧	
第十二章 第二定律在燃烧中的应用	(320)
基本概念/单质的分解/分解的热效应/平衡常数与温度的关系/杂题	
第十三章 杂题	(333)
统计热力学/传输特性/气体导热系数/液体导热系数/气体黏度/液体黏度/杂题/封闭系统的烟/开放系统的烟	
第十四章 增补题	(348)
第一章/第二章/第三章/第四章/第五章/第六章/第七章/第八章/第九章/第十章/第十一章/第十二章/第十三章/其他杂题	

附录 A	水的性质	(379)
附录 B	大气压下过热空气的性质	(391)
附录 C	氟里昂(R12)的性质	(394)
附录 D	25 种常用流体的分子量和临界参数	(401)
附录 E	压缩系数图	(402)
附录 F	湿度表和湿度图	(405)
附录 G	热化学表	(410)
附录 H	几种随温度变化的气体分解的平衡常数	(415)

第一章 基本概念

压强

- 1.1 (a) 定义压强;(b)SI制压强单位是什么?(c)USCS(美国通用单位)制中压强的常用单位是什么?(d)什么是大气压、巴、英寸汞和毫米汞?

解 (a)施加在单位面积上的垂直作用力。

(b)帕斯卡(Pa),即牛顿/米²。因为Pa的单位很小,常用千帕(1kPa=1000Pa)。

(c)磅/英寸²,简称为psi或psia,1 lb_f/in²=1psi。

(d)大气压是压强的国际参考单位,定义为1atm=101.325kPa(精确值),它与0℃时760mm汞柱的压强之间的误差小于七百万分之一。因此,毫米汞(1mmHg)等于 $101325/760 = 133.322\text{Pa} = 0.019337\text{psia}$ 。由于1inch=25.4mm(精确值),英寸汞等于 $(25.4)(133.322) = 3386.4\text{Pa} = 3.3864\text{kPa} = 0.49116\text{psia}$ 。而巴(bar)的精确定义为 $10^5\text{Pa} = 100\text{kPa} = 14.5038\text{psia}$ 。1bar≈1atm(误差小于1%)。

- 1.2 什么是绝对压强和表压强?

解 题1.1(a)中定义的就是绝对压强,而表压强是绝对压强与大气压强的差。若大气压强为 P_0 ,绝对和表压强分别为 P 和 P_g ,则 $P = P_0 + P_g$ 。表压强在美国通用单位制中使用。

- 1.3 用密度为13.59508g/cm³的汞作为测压液,760mm汞柱高的压强是多少帕?

解 基本公式为 $P = \rho gh$, P 是液体柱的压强, ρ 是液体密度, h 是液体柱高, g 是重力加速度。在SI制中, $g = 9.80665\text{m/s}^2$, $h = 0.760\text{m}$,且

$$\rho = \left(\frac{13.59508}{1\text{cm}^3} \text{g} \right) \left(\frac{1\text{kg}}{10^3\text{g}} \right) \left(\frac{10^6\text{cm}^3}{1\text{m}^3} \right) = 13.59508 \times 10^3 \text{kg/m}^3$$

因此 $P = (13595.08)(9.80665)(0.760) = 101325\text{Pa}$ 。(因密度是精确值,所以结果是精确的1个大气压)

- 1.4 用非SI单位,汞密度为848.7112lb_m/ft³,重力加速度为32.174ft/sec²,汞高为29.92126in,重解题1.3。

$$\begin{aligned} P &= \rho(g/g_c)h \\ &= (848.7112\text{lb}_m/\text{ft}^3)[(32.174\text{ft}/\text{sec}^2)/(32.174\text{lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2)](29.92126/12)\text{ft} \\ &= 2116.209\text{lb}_f/\text{ft}^2 = 14.69590\text{lb}_f/\text{in}^2 \end{aligned}$$

这是标准大气压在新单位下的精确值。

- 1.5 用密度为850lb_m/ft³的汞作为测压液,1ft汞高为多少psia?

解 题1.4表明,标准重力条件下,质量为1lb_m的物体重1lb_f。因此,压强公式可写成 $P = \rho_w h$, ρ_w 是重量密度。由题给数据,

$$P = (850\text{lb}_f/\text{ft}^3)(1\text{ft}) = (850\text{lb}_f/\text{ft}^3)/(144\text{in}^2/\text{ft}^2) = 590\text{psia}$$

- 1.6 产生14.7lb_f/in²的压强所需的汞高为多少?

解 由题1.5的结果,可得

$$h = \frac{14.7}{5.90}(12\text{in}) = 29.90\text{in}$$

(可与题1.4比较)

- 1.7 一容器内装有10ft深的液体,其密度为50lb_m/ft³,重力加速度为32.2ft/sec²,大气压强为14.70psia,求容器底部的压强。

$$\begin{aligned} P_{1,2} &= P_0 + \rho_w d = (14.70\text{psia}) + (50\text{lb}_f/\text{ft}^3)(10\text{ft})(144\text{in}^2/\text{ft}^2) \\ &= 18.17\text{psia} \end{aligned}$$

- 1.8 若一真空室的表压强为-500mbar,而大气压强为1015mbar,系统的绝对压强为多少?

解 绝对压强等于表压强与大气压强之和, 因为大气压强为 1015mbar, 而表压强为 -500mbar (即有 500mbar 的压强反抗大气压) 所以绝对压强为

$$1015 - 500 = 515 \text{ mbar}$$

1.9 将 20in 汞柱化成 psia 表示, 已知大气压强为 14.7psia.

解 由题 1.1(d), $20 \text{ inHg} = 20(0.49116) = 9.8 \text{ psia}$

因此

$$P = 14.7 - 9.8 = 4.9 \text{ psia}$$

注: 高真空系统的表压强为负值.

1.10 图 1-1 所示的水银压强计的一端与大气相连. 气压为 760mm 汞, 求气体容器的绝对压强(mmHg).

解 L_1 处的压强 = L_2 处的压强, 即

$$760 \text{ mmHg} = P + (200 \text{ mmHg}), \quad P = 560 \text{ mmHg}$$

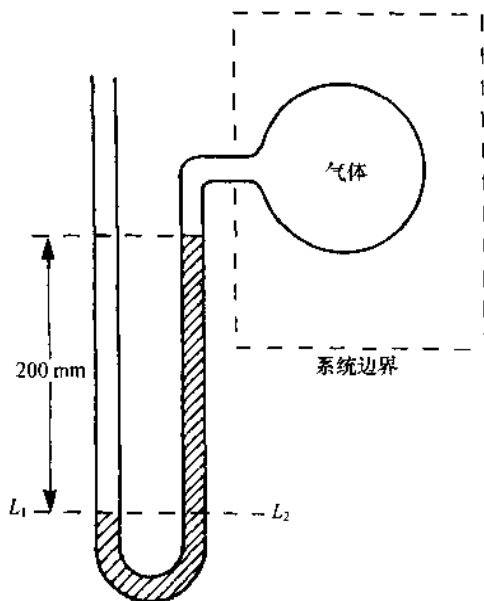


图 1-1

1.11^D 一体积不变的气体温度计 (参见图 1-1) 浸在 $T_1 = 100^\circ\text{C}$ 的沸水中, 读数 $Z_1 = 30.0 \text{ cmHg}$, 若将温度计浸在 $T_2 = 150^\circ\text{C}$ 的散热液体中, 水银柱的高度 Z_2 为多少厘米? 已知大气压强为 76.0cmHg.

解 此题单位是 cmHg. 设温度计中的气体体积始终不变, 即 $P/T = \text{常数}$, P 是大气压强和表压强之和, T 是开尔文温度. 则

$$\frac{Z_0 + Z_2}{T_2} = \frac{Z_0 + Z_1}{T_1}$$

代入数据:

$$\frac{76 + Z_2}{150 + 273} = \frac{76 + 30}{100 + 273}$$

得

$$Z_2 = 44.4 \text{ cm}$$

1.12^D 将题 1.11 中的温度计置于另一液体中, 测得水银柱高度差为 40cm, 求液体的温度.

解 下式仍然适用:

$$\frac{Z_0 + Z_2}{T_2} = \frac{Z_0 + Z_1}{T_1}$$

代入数据:

$$\frac{76 + 40}{T_2} = \frac{76 + 30}{100 + 273}$$

得

$$T_2 = 408 \text{ K}, \quad t_2 = 408 - 273 = 135^\circ\text{C}$$

1.13^D 温度为多少时,题 1.11 中的温度计的水银柱高度差为零?

解 将数据代入 $\frac{Z_0+Z_2}{T_2} = \frac{Z_0+Z_1}{T_1}$

中,得 $\frac{76+0}{T_2} = \frac{76+30}{100+273}$

解得 $T_2=268\text{K}, \quad t_2=268-273=-5^\circ\text{C}$

1.14^D 若题 1.11 中水银高度差为 -9.5cm , (a) 液体温度为多少($^\circ\text{C}$)? 这一结果有何特殊性?

解 (a) $\frac{76-9.5}{T_2} = \frac{76+30}{100+273}$

得 $T_2=234\text{K}, \quad t_2=234-273=-39^\circ\text{C}$

(b) 水银的凝固点正好为 -39°C , 因此温度计的测温范围应高于此温度.

1.15 对题 1.11 中的温度计,求高度 Z 与摄氏温度 $t(^{\circ}\text{C})$ 之间的关系表达式.

解 $\frac{76+Z}{t+273} = \frac{76+30}{100+273}$

$Z=1.6+0.2842t$

1.16^D 一气体温度计(图 1-1)浸在 $T_1=212^\circ\text{C}$ 的沸水里,读得 $Z_1=15.0\text{inHg}$. 放到 500°C 的液体中的读数 Z_2 为多少英寸? 已知大气压为 30.0inHg .

解 设气体体积不变, $P/T=\text{常数}$, P 等于大气压强加表头读数, T 是气体温度. 因此

$$\frac{Z_0+Z_2}{T_2} = \frac{Z_0+Z_1}{T_1}$$

代入数据: $\frac{30-Z_2}{500+460} = \frac{30+15}{212+460}$

得 $Z_2=34.3\text{inHg}$

1.17^D 将题 1.16 中的温度置于另一液体中,测得水银柱高为 40in , 求液体的温度($^\circ\text{F}$),

解 $\frac{Z_0+Z_2}{T_2} = \frac{Z_0+Z_1}{T_1}$, 代入, 得 $\frac{30+0}{T_2} = \frac{30+15}{212+460}$

得 $T_2=448^\circ\text{R}, \quad t_2=448-460=-12^\circ\text{F}$

1.18^D 题 1.16 中的温度计在多少 $^\circ\text{F}$ 时水银柱的高度为零?

解 代入 $(Z_0+Z_2)/T_2 = (Z_0+Z_1)/T_1$ 有 $(30+0)/T_2 = (30+15)/(212+460)$ 得

$T_2=448^\circ\text{R}, \quad t_2=448-460=-12^\circ\text{F}$

1.19^D 又:若题 1.16 中温度计的读数为 -17.5in , (a) 所测流体温度为多少($^\circ\text{F}$)? (b) 这一结果有何特别?

解 (a) $\frac{30-1.75}{T_2} = \frac{30+15}{212+460}$

得 $T_2=422^\circ\text{R}, \quad t_2=422-460=-38^\circ\text{F}$.

(b) 水银凝固点为 -38°F , 正是此题对应结果.

1.20 若从文献中查 200°C (400°F) 时 n -癸烷的 P - V - T 数据, 数据可能是不准确的. 这就需要用气体温度计(汞作为测压物质)测量各种质量的癸烷以至一系列 V 不变时的 P - T 数据. 什么原因使查表数据不够准确?

解 (1) 系统内包含了高温气体, 它应在大气中即时冷却(见图 1-1), 而实际的情况限制了数据的精确性.

(2) 实际上, 高温气体加热了水银, 水银的蒸气压影响结果的准确性.

(3) 200°C (400°F) 时的化学分解影响结果.

体积

1.21 换算单位: (a) $\text{in}^3 \rightarrow \text{dm}^3, \text{cm}^3, \text{mm}^3, \text{L}, \text{mL}$; (b) $\text{ft}^3 \rightarrow \text{dm}^3$; (c) $\text{yd}^3 \rightarrow \text{dm}^3, \text{m}^3$.

解 换算关系为 $1\text{in}=2.54\text{cm}$.

(a) 因为 $1\text{dm}^3 = 10^3\text{cm}^3 = 10^6\text{mm}^3$, 所以

$$1\text{in}^3 = (2.54\text{cm})^3 = 16.38706\text{cm}^3 = 0.01638706\text{dm}^3 = 16387.06\text{mm}^3$$

对于液体, 单位升(L)定义为 $1\text{L} = 1\text{dm}^3$, 所以

$$1\text{in}^3 = 0.01638706\text{L} = 16.38706\text{mL}$$

(b) $1\text{ft}^3 = 12^3\text{in}^3 = 12^3(0.01638706\text{dm}^3) = 28.3168\text{dm}^3$.

(c) $1\text{yd}^3 = 27\text{ft}^3 = 27(28.3168\text{dm}^3) = 764.554\text{dm}^3 = 0.764554\text{m}^3$.

温度

1.22 (a) 定义温度. (b) 举出四种常用温标及其换算关系.

解 (a) 温度是物体内能的量度.

(b) 华氏($^{\circ}\text{F}$): 美国常用温标; 摄氏($^{\circ}\text{C}$): SI 制温标; 朗氏($^{\circ}\text{R}$): 美国常用温标; 开氏(K): SI 制绝对温标.

换算关系

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(^{\circ}\text{F} - 32), \quad \text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15, \quad ^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459.69, \quad ^{\circ}\text{R} = \frac{9}{5}\text{K}$$

(常取 $273.15 \approx 273$; $459.69 \approx 460$)

温度间隔的换算

$$1^{\circ}\text{C} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{F}, \quad 1\text{K} = 1^{\circ}\text{C}, \quad 1^{\circ}\text{R} = 1^{\circ}\text{F}, \quad 1^{\circ}\text{R} = \frac{5}{9}\text{K}$$

1.23 朗氏 $360(^{\circ}\text{R})$ 等于摄氏多少度($^{\circ}\text{C}$)?

解 换下列方式换算: $\text{R} \rightarrow \text{K} \rightarrow \text{C}$

$$\text{K} = \frac{5}{9}(360) = 200, \quad ^{\circ}\text{C} = 200 - 273.15 = -73.15$$

1.24 开氏多少度等于 170°F ?

解 换下列方式换算: $\text{F} \rightarrow \text{R} \rightarrow \text{K}$

$$^{\circ}\text{R} = 170 + 459.69 = 629.69, \quad \text{K} = \frac{5}{9}(629.69) = 349.83$$

1.25 50°C 等于华氏多少度($^{\circ}\text{F}$)?

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}^{\circ}\text{C} + 32 = \frac{9}{5}(50) + 32 = 122$$

1.26 将 150K 换算成 $^{\circ}\text{F}$

解 换下列方式换算: $\text{K} \rightarrow \text{C} \rightarrow \text{F}$

$$^{\circ}\text{C} = 150 - 273 = -123, \quad ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5}(-123) + 32 = -189$$

1.27 冰在里氏(Re) 0° 时溶化而在 80° 时沸腾, 绝对零度对应的里氏温标是多少?

解 从冰点到沸点, 里氏 80°Re 的温差等价于摄氏 100°C 的温差. 所以从冰点到绝对零度 273.15°C 的减少等价于

$$(-273.15)(80/100) = -281.52^{\circ}\text{Re}$$

1.28 用 USCS 温标验证题 1.27.

解 由题 1.22 可得出下列关系

$$1^{\circ}\text{Re} = \frac{180}{80}^{\circ}\text{F} = \frac{180}{80}^{\circ}\text{R}$$

因为绝对零度为 $459.69 + 32 = 491.69^{\circ}\text{R}$, 所以绝对零度为

$$\frac{80}{180}(-491.69) = -218.53^{\circ}\text{Re}$$

1.29 硫的沸点为 444.50°C , 它等于里氏多少度($^{\circ}\text{Re}$)?

解 摄氏和里氏温标零点相同, $1^{\circ}\text{C} = (80/100)^{\circ}\text{Re}$, 所以

$$\frac{80}{100}(444.50) = 355.60^{\circ}\text{Re}$$

1.30 硫沸点的华氏温度是多少?

解 由题 1.29 $(9/5)(444.50) + 32 = 832^{\circ}\text{F}$

1.31 在题 1.27 至 1.29 中,术语“点”表示一转变温度,即冰点为 $0^{\circ}\text{C} = 273.15\text{K} = 32^{\circ}\text{F} = 459.69^{\circ}\text{R}$. 为什么这一术语(a)比较粗糙.(b)用在这里?

解 (a)开氏温标的零点是绝对零度,而水的三相点温度是 273.16K ,该温度下,水的三相(冰、水、蒸汽)共存.没有定义过其他相转变温度,所以“冰点”,“沸点”,“硫的沸点”等无物理意义.
(b)“沸点”的讲法比“水的转变温度”的讲法好在指出了液体转变为蒸汽,故用之.

1.32 一些外星人说在他们的绝对温标系统内,水的冰点为 $9840(^{\circ}\text{L})$. (a)水的沸点是多少($^{\circ}\text{L}$)? (b) 18000°L 相当于地球温度多少($^{\circ}\text{F}$)?

解 因为 $^{\circ}\text{L}$ 是绝对温标,所以可与地球上的绝对温标(如 K)比较.

(a)因为 $9840^{\circ}\text{L} = 491.69^{\circ}\text{R}$, 所以 $1^{\circ}\text{R} = \frac{9840}{491.69} = 20.01^{\circ}\text{L}$.

$$671.69^{\circ}\text{R} = \text{水的沸点} = 671.69(20.01) = 13441^{\circ}\text{L}$$

(b) 18000°L 为 $\frac{18000}{20.01} \approx 900^{\circ}\text{R}$, $900 - 460 = 440^{\circ}\text{F}$.

1.33 外星人自豪地告诉地球人他的实用温标不是绝对温标但符合许多物理概念.该温标的冰点温度为 2.43640 度,沸点温度为 2.57188 度.当人们要他给出实用温标的绝对零度时,他耸耸肩说他给不出来,只说是一个很大的负数.你能想象出“UFO”的温标与我们的关系吗?

解 从题意猜测,我们的温度是 UFO 温度的某个指数函数,事实上公式 $T_{\text{UFO}} = \log T_{\text{K}}$ 与题意相符.当然这公式不是惟一的,我们也只能猜测到这些.

质量

1.34 定义:(a)美制吨;(b)英制吨;(c)公制吨.请用(i)磅表示.(ii)公斤表示.

解 (a)美制吨为(i) 2000lb_m . (ii) 907.1847kg .

(b)英制吨为(i) 2240lb_m . (ii) 1016.0469kg .

(c)公制吨为(i) 2204.6226lb_m . (ii) 1000.0000kg .

质量流量

1.35 水以 50cfm ($50\text{ft}^3/\text{min}$) 流过隧道,质量流量为多少? (a)用 gpm (每分钟加仑)表示. (b)用 ton/h (每小时吨) (美制)表示. (c)以 kg/h (每小时千克)表示.

解 (a) 1gal (美制)定义为 $231\text{in}^3 = 0.1337\text{ft}^3$, 所以

$$50\text{cfm} = \left(50 \frac{\text{ft}^3}{\text{min}}\right) \left(\frac{1\text{gal}}{0.1337\text{ft}^3}\right) = 374\text{gpm}$$

(b)参见题 1.41, 1gal 水重 8.337lb_m , 所以

$$50\text{cfm} = \left(374 \frac{\text{gal}}{\text{min}}\right) \left(\frac{8.337\text{lb}_m}{1\text{gal}}\right) \left(\frac{1\text{ton}}{2000\text{lb}_m}\right) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}}\right) = 93.5\text{ton/h}$$

(c) $(93.5\text{ton/h})(907.1847\text{kg/ton}) \approx 84860\text{kg/h}$

1.36 下列换算关系 $1(\text{U. S.})\text{gpm} = 6(\text{U. S.})\text{ton/day}$ 精确度如何?

解 因为 1U. S. 加仑等于 8.339lb_m , 所以

$$1\text{gpm} = (8.339\text{lb}_m/\text{min})(60\text{min/h})(24\text{h/day})(0.0005\text{ton/lb}_m) = 6.004\text{ton/day}$$

精确度较高.

1.37 20kg/s 的水流过大坝,质量流量为多少(lb_m/h)?

解 $20\text{kg/s} = (20\text{kg/s})(2.2046\text{lb}_m/\text{kg})(3600\text{s/h}) = 158731\text{lb}_m/\text{h}$

容积

1.38 一美制加仑等于多少立方米?

$$\text{解} \quad 1\text{gal} = 231\text{in}^3 = (231\text{in}^3) \left(\frac{2.54 \times 10^{-2}\text{m}}{1\text{in}} \right)^3 = 3.785 \times 10^{-3}\text{m}^3$$

- 1.39 1963 年英国度量衡执行署颁布:1 英制加仑为 10lb 重量密度为 0.998859g/ml 的蒸馏水处于重量密度为 0.001217g/ml 的空气中所占有的体积。(a)此标准中单位是否统一? (b)为什么提到空气重量密度? (c)1 加仑等于多少立方分米?

解 (a)1963 年 SI 制尚未起用,所以标准中既有英制(10lb),也有公制(g/ml)单位。

(b)考虑空气浮力可以保证最大可能的精度。

$$(c) \text{体积} = \frac{\text{质量}}{\text{密度}} = \frac{(10\text{lb}_m)(453.59\text{g/lb}_m)}{(0.998859\text{g/ml})(1000\text{ml/dm}^3)} = 4.5404\text{dm}^3.$$

- 1.40 “一品脱就是一磅水的体积”此说法准确度如何?

解 1 美制品脱(pint)定义为 $28.875\text{in}^3 = 0.01671\text{ft}^3$. 在 60°F , 水的比体积为 $0.01603\text{ft}^3/\text{lb}_m$ (见表 A1). 因此, 0.01671ft^3 的水重 $(0.01671\text{ft}^3)(0.01603\text{ft}^3/\text{lb}_m) = 1.042\text{lb}_m$ 误差约为 4%.

[注:这里及下面引用的热力学图表见本书后面的附录]

- 1.41 “一加仑水重十磅”此说法是否正确?

解 若指英制加仑,参见题 1.39,因为水的密度总是约等于 1g/cm^3 ,所以是正确的. 而由题 1.38 和题 1.39 可知,--美制加仑水仅重

$$\frac{3.785\text{dm}^3}{4.5404\text{dm}^3}(10\text{lb}_m) \approx 8.34\text{lb}_m$$

速度

- 1.42 以 km/h 和 m/s 表示限制速度:(a)55mph, (b)65mph.

$$\text{解} \quad 1\text{mile} = 5280\text{ft} = 5280(0.3048\text{m}) = 1609\text{m}, 1\text{h} = 3600\text{s}$$

$$(a) 55\text{mph} = (55)(1609)\text{m/h} = 8849\text{m/h} = 88.495\text{km/h}$$

$$88495/3600 = 24.58\text{m/s}$$

$$(b) 65\text{mph} = (65/55)88.495 = 104.585\text{km/h}$$

$$(65/55)24.58 = 29.05\text{m/s}$$

- 1.43 加拿大计量委员会规定:“市里普通公路限速为 50km/h,高速公路限速为 100km/h,最高不超过 120km/h”用 mph 表示这些速度.

解 $50\text{km/h} = (50000\text{m/h})(1609\text{m/mi}) = 31.07\text{mph}$, 因此,由此例知,

$$100\text{km/h} = 62.14\text{mph}, \quad 120\text{km/h} = 74.57\text{mph}$$

重力加速度

- 1.44 一物体在地球表面重 150lb_f . 在月球上某点,重力加速度为 6ft/s^2 ,该物体重多少(lb_f)?

解 重量 w 变,但质量 $m = w/g$ 不变,因此

$$w_M/g_M = w_E/g_E$$

即

$$w_M = (g_M/g_E)w_E = (6/32.2)(150) \approx 28\text{lb}_f$$

- 1.45 月球的重力加速度为地球的($g = 32.174\text{ft/s}^2$)六分之一,求在地球上重 180lb_f 的物体在月球上自由下落时受到的力.

解 由牛顿定律,质量不变时力正比于加速度,该物体受到的力为 $(1/6)(180) \approx 30\text{lb}_f$.

- 1.46 一物体密度为 $50\text{lb}_m/\text{ft}^3$,重力加速度为 6ft/s^2 . 其比重是多少 lb_f/ft^3 ?

解 与质量一样,物体密度不变(只要体积不变). 因此, 1lb_m 质量的物体重 1lb_f , 比重为 $50\text{lb}_f/\text{ft}^3$.

功和能

- 1.47 将千瓦小时换算成:(a)kJ;(b)Btu;(c)hphr(马力小时).

解 (a) $1\text{kWhr} = (1000\text{J/s})(3600\text{s}) = 3.6 \times 10^6\text{J} = 3600\text{kJ}$;

(b) 3413Btu ;

(c) 1.341hphr .

1.48 试写出两种单位制的热功当量.

解 $778.16\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}$ 或 4.184J/cal (SI 制中, 热能单位为焦耳, 4.184J/cal 可作为卡的定义).

1.49 一蒸汽机的功为 200hphr , 表示成 kWhr .

解 由题 1.47(c) 知, $200\text{hphr} = (200\text{hphr})(1/1.341\text{kWhr/hphr}) \approx 149\text{kWhr}$

1.50 什么是摄氏热量单位? 换算成下列单位:

(a) Btu ; (b) $\text{ft} \cdot \text{lb}_f$; (c) kJ .

解 一摄氏热量单位(chu)代表 1 磅水温度升高 1°C 需要的能量, 而 Btu 是 1 磅水温度升高 1°F ($5/9^\circ\text{C}$) 所需能量, 所以

(a) $1\text{chu} = (9/5)\text{Btu}$;

(b) $1\text{chu} = (9/5)(778.16) = 1400.7\text{ft} \cdot \text{lb}_f$;

(c) $1\text{chu} = (1.8\text{Btu})(1.005\text{kJ/Btu}) = 1.899\text{kJ}$.

第二章 流体的热学性质 理想气体

理想气体过程

在题 2.1~2.23 中, 画图表示各个过程.

2.1 气体等压加热, 体积增加一倍. (P - V 图)

解 见图 2-1, $P=\text{常数}$, $V_2=V_1$.

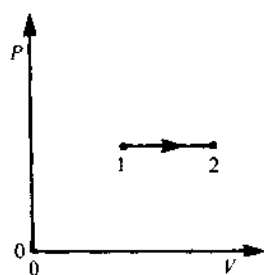


图 2-1

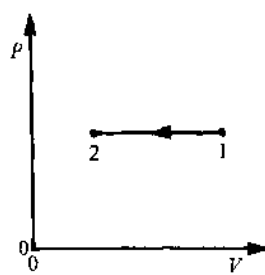


图 2-2

2.2 气体等压冷却, 体积减少为原来的 $1/3$. (P - V 图)

解 见图 2-2, $P=\text{常数}$, $V_2=(1/3)V_1$.

2.3 气体等体加热, 压强增加一倍. (P - V 图)

解 见图 2-3, $P_2=2P_1$, $V=\text{常数}$.

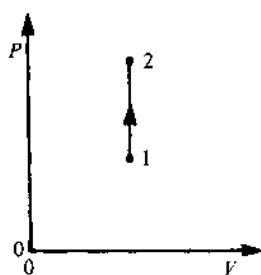


图 2-3

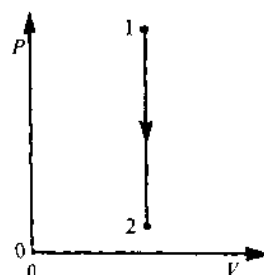


图 2-4

2.4 气体等温冷却, 体积减少为原来的 $\frac{1}{10}$. (P - V 图)

解 见图 2-4, $P_2=0.1P_1$, $V=\text{常数}$.

2.5 气体等温加热, 体积增加一倍. (P - V 图)

解 见图 2-5, $V_2=2V_1$, $PV=\text{常数}$.

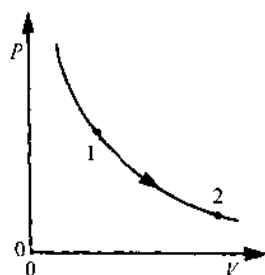


图 2-5

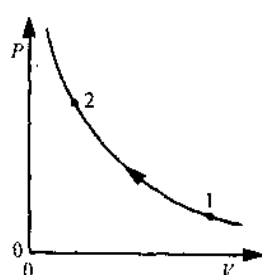


图 2-6

2.6 气体等温冷却至原体积的 $\frac{1}{4}$. (P - V 图)

解 见图 2-6, $V_2 = (1/4)V_1$, $PV = \text{常数}$.

2.7 气体经历一等温过程. (P - V 图)

解 见图 2-7, 图 2-8. 图中曲线为双曲线. “等温”意味着温度不变, 但可能是加热, 也可能是冷却. 两种过程可画在同一条等温线上(图 2-7); 也可以分开画(图 2-8). 这时两过程的温度不同.

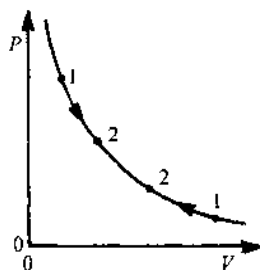


图 2-7

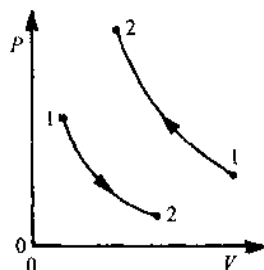


图 2-8

2.8 气体等体加热 (P - T 图)

解 见图 2-9. $1 \rightarrow 2$ 为一直线段, 其延长线过原点 ($P/T = \text{常数}$). 注意: T 必须是绝对温标.

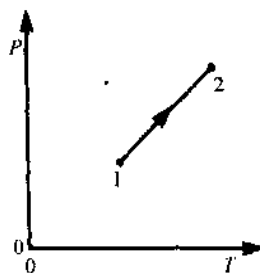


图 2-9

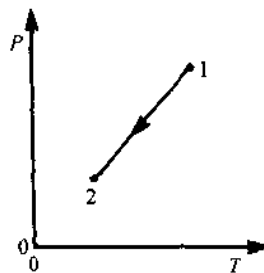


图 2-10

2.9 气体等体冷却. (P - T 图)

解 见图 2-10.

2.10 两个相同的刚性容器(A和B)装有不同质量的同种理想气体, 加热时, 容器内的压强的初态和末态值均相等(图 2-11), 哪一容器内的气体质量较多? (P - T 图)

解 理想气体方程可写为 $PV = \left(\frac{m}{M}\right)R_s T$, m 是总质量而 M 是摩尔质量. 因为压强任意时刻均相等, 所以温度较低的容器(A)内一定气体较多.

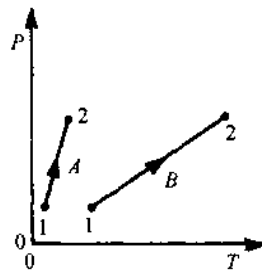


图 2-11

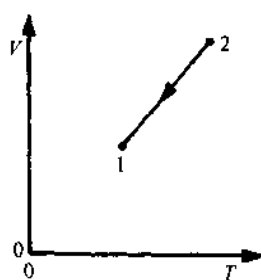


图 2-12

2.11 气体等压冷却, 温度减小为初始绝对温度值的一半. (V - T 图)

解 见图 2-12. $V/T = \text{常数}$, 直线段的延长线过原点.

2.12 气体等压加热体积增加 50%。(V-T 图)

解 见图 2-13. $V_2 = 1.5V_1$, $V/T = \text{常数}$.

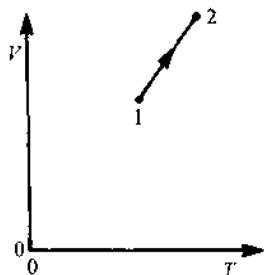


图 2-13

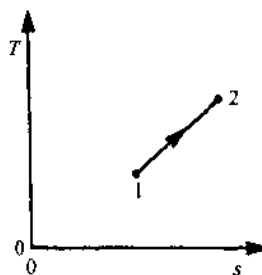


图 2-14

2.13 气体等压加热, 温度增加一倍。(T-s 图)

解 见图 2-14. 注意 1, 2 之间的连线是弯曲的, 只在变化范围较小时可视为直线.

2.14 气体等体加热, 温度增加一倍。(T-s 图)

解 见图 2-15. 与题 2.13 类似, 1, 2 之间是曲线, 只在变化较小时近视为直线.

2.15 图 2-15 中的曲线变化是否应比图 2-14 陡直?

解 是的. 参见题 4.79.

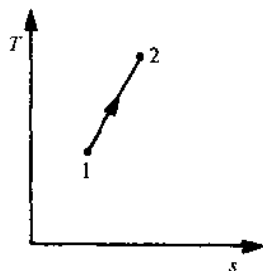


图 2-15

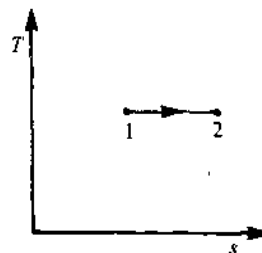


图 2-16

2.16 气体经历一等温过程, 压强减少一半。(T-s 图)

解 见图 2-16. 题 2.325 将给出, 等温过程的熵变为 $\Delta s = -R \ln(P_2/P_1)$. $P_2 < P_1$ 时, Δs 为正, 所以变化方向如图(不同气体, R 不同, Δs 有所不同).

2.17 气体经历等温过程, 体积减少为原来的 $\frac{1}{3}$ 。(T-s 图)

解 见图 2-17. 题 2.325 将给出, 等温熵变也可表示为 $\Delta s = R \ln(V_2/V_1)$, $V_2 < V_1$, $\Delta s < 0$. 因此熵变方向如图所示(熵变大小与气体有关).

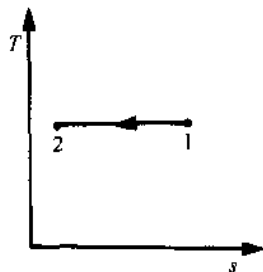


图 2-17

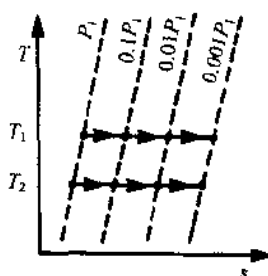


图 2-18

2.18 气体经历等温过程, 压强减少为原来的 $\frac{1}{10}, \frac{1}{100}, \frac{1}{1000}, \dots$. 等温过程的温度分别为 T_1 和 $T_2 < T_1$, T_1, T_2 之间的差值不大。(T-s 图)

解 见图 2-18. 由题 2.16 中的方程, 等温过程中, 压强每减少至 $\frac{1}{10}$, 熵增加 $R \ln 10$; 因此图 2-18

中虚线之间是等间隔的。

2.19 气体压缩, 压强增加了 100 倍, 温度不变. ($\log P-h$ 图)

解 见图 2-19. 对理想气体, 题 4.176(a) 将给出 $(\Delta h / \Delta P)_T = 0$, 即 $\Delta h = 0$ 所以焓不变.

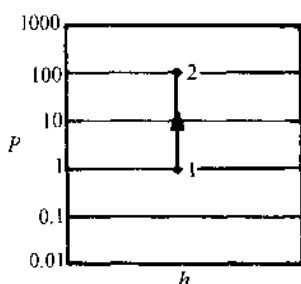


图 2-19

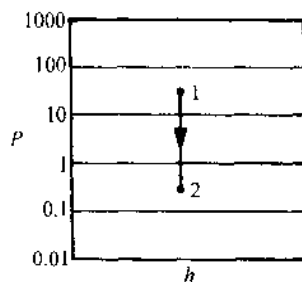


图 2-20

2.20 气体等温膨胀至原体积的 100 倍. ($\log P-h$ 图)

解 见图 2-20. 等温过程的理想气体 $V_2/V_1 = P_1/P_2$; 若 $V_2 = 100V_1$, 则 $P_2 = (1/100)P_1$. 因为理想气体的焓与压强无关 (见题 2.19), 所以也与体积无关, 过程为竖直线.

2.21 气体绝热压缩, 压强增加一倍. ($\log P-h$ 图)

解 见图 2-21. 对于绝热压缩过程, $\Delta Q = T\Delta S = 0$, 所以, 1, 2 之间为等熵线, 1, 2 之间的曲线形式的计算已超出本章范围.

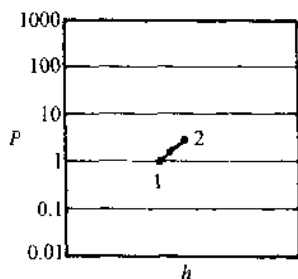


图 2-21

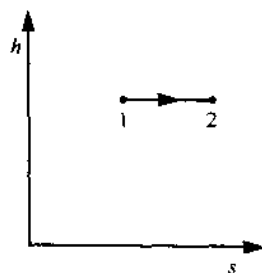


图 2-22

2.22 气体经历一等温过程, 压强减少一半. ($h-s$ 图)

解 见图 2-22. 由题 2.16 知, 等温膨胀熵增加, 由题 2.20 知, 等温过程焓不变, 故过程如图所示.

2.23 气体经历一等温过程, 体积减少为原来的 $\frac{1}{100}$. ($h-s$ 图)

解 见图 2-23. 压强增加至初值的 100 倍; 由题 2.18 知, 熵增为 $2R\ln 10$. 由题 2.19 知, 理想气体的焓与压强无关, 所以如图 2.23 所示.

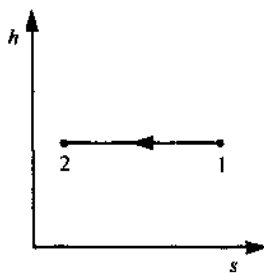


图 2-23

真实流体过程

- 2.24 在 P - V 图上画出:(a)典型的理想气体曲线;(b)典型的真实气体曲线;(c)考虑气体冷凝的曲线。

解 见 图 2-24.

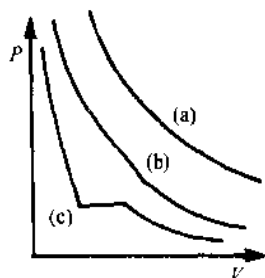


图 2-24

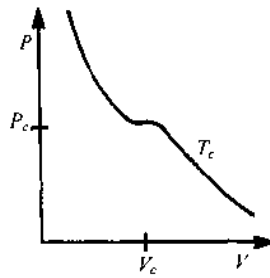


图 2-25

- 2.25 在 P - V 图上画出临界等温线,并标出临界压强 P_c 和临界体积 V_c .

解 见 图 2-25.

- 2.26 在 P - V 图上画出凝固时收缩的物质的饱和蒸汽线和升华线,并标出压缩量 ΔV .

解 见 图 2-26.

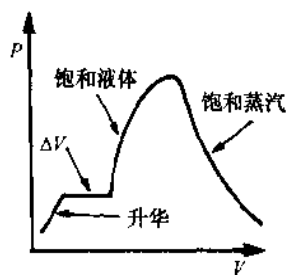


图 2-26

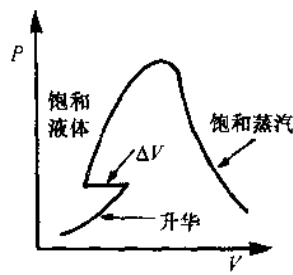


图 2-27

- 2.27 对于水蒸气,图 2.26 应如何修改?

解 见 图 2-27. 由图可知水冷冻时体积增加.

- 2.28 P - V 图上一流体冷冻时体积收缩,画出溶化曲线,并标出固态区、液态区和固、液混合区。

解 见 图 2-28.

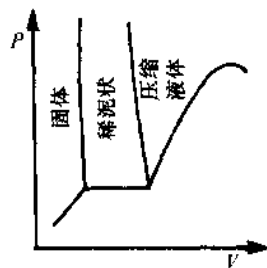


图 2-28

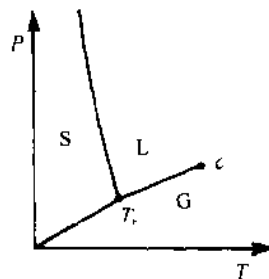


图 2-29

- 2.29 对凝固时体积收缩的流体,在 P - T 图上画出溶解、沸腾和升华曲线,并标出固态区(S)、液态区(L)和气态区(G)以及临界点(c)和三相点(T_r)

解 见 图 2-29.

2.30 对凝固时膨胀的流体,重解题 2.29.

解 见图 2-30.

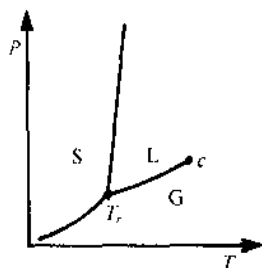


图 2-30

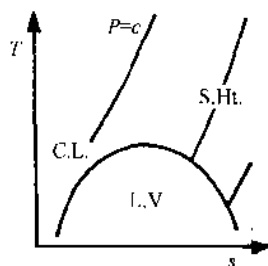


图 2-31

2.31 在 $T-s$ 图上画出饱和液体和饱和蒸汽曲线. 标出压缩液体区(C. L.), 液体-蒸汽共存区(L. V.) 过热蒸汽区(S. Ht.) 并画出典型的等压线.

解 见图 2-31.

2.32 用 $(\log P)-h$ 图重解题 2.31.

解 见图 2-32.

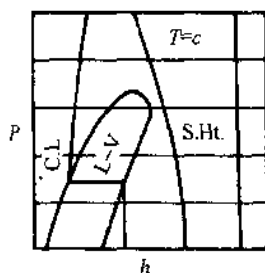
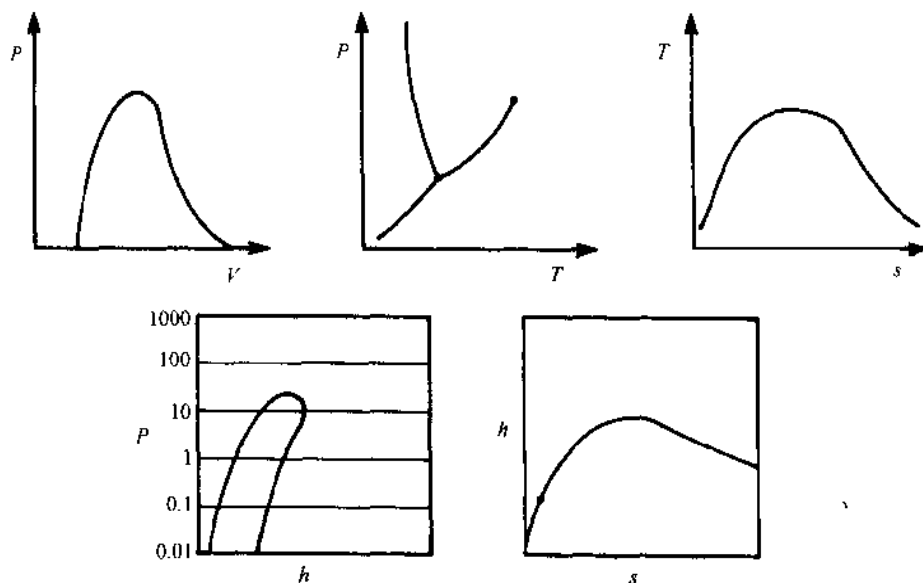


图 2-32

单相和两相过程

题 2.33~2.59 要求画出一些过程的图线, 下列为样图.



2.33 一种物质在等温下从压缩液体变为过热蒸汽. ($P-V$ 图)

解 如图 2-33, 点 1 在饱和蒸汽曲线左侧, 点 2 在过热区内.

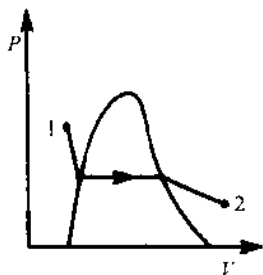


图 2-33

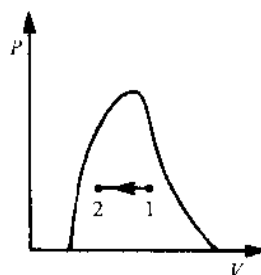


图 2-34

2.34 一气液共混物中气体质量从 75% 减少至 25%. (P - V 图)

解 见图 2-34.

2.35 饱和蒸汽等体加热. (P - V 图)

解 见图 2-35. 末态点 2 可为 2a 点(亚临界压强)或 2b 点(超临界压强).

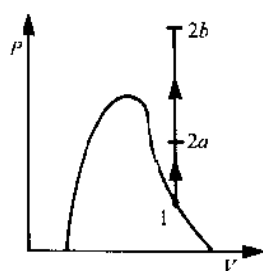


图 2-35

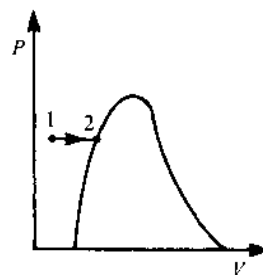


图 2-36

2.36 压缩液体在常压下加热至饱和液体态. (P - V 图)

解 见图 2-36.

2.37 过热蒸汽等温压缩至饱和液体态. (P - V 图)

解 见图 2-37.

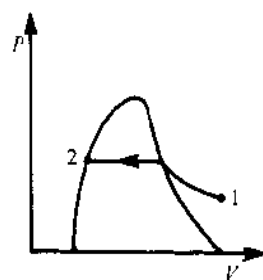


图 2-37

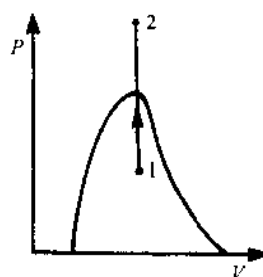


图 2-38

2.38 气液共混物等体加热直至经过临界点. (P - V 图)

解 见图 2-38.

2.39 饱和蒸汽等体加热, 直至压强增大一倍. (P - V 图)

解 见图 2-39. $P_2 = 2P_1$.

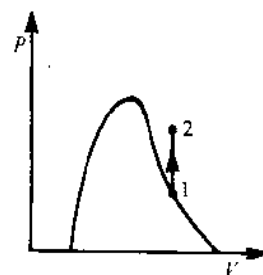


图 2-39

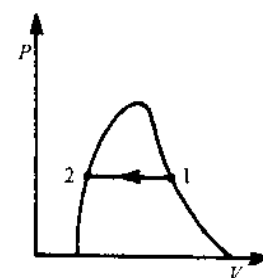


图 2-40

2.40 饱和蒸汽等温压缩成饱和液体. (P - V 图)

解 见图 2-40.

2.41 饱和蒸汽等压压缩成饱和液体. (P - V 图)

解 见图 2-40. 任意一物质从饱和蒸汽态压缩, 压强和温度均不变, 参见题 2.40.

2.42 饱和液体冷却成饱和蒸汽, 压强变为原来的 $\frac{1}{2}$. (P - V 图)

解 见图 2-41. 注意此结果并不与题 2.40 和题 2.41 矛盾.

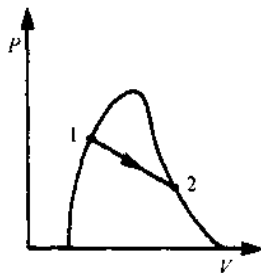


图 2-41

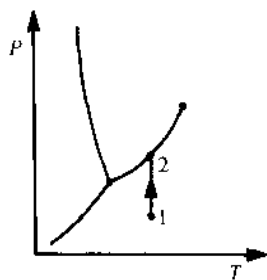


图 2-42

2.43 过热蒸汽被增压, 温度保持不变, 直至成为干饱和蒸汽. (P - T 图)

解 见图 2-42. 过气体被压缩至饱和, 成为气、液两相平衡或固、气两相平衡的状态, 一种更特殊的情形是过气体被压缩至三相点或临界点状态.

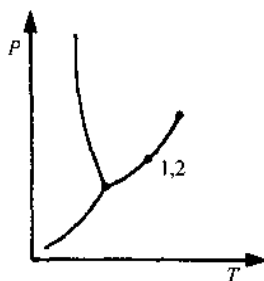
2.44 在恒定的压强下加热饱和液体直至所有的液体恰好全部蒸发. (P - T 图)解 见图 2-43. 在恒定的压强下加热纯净的液体至液体恰好全部蒸发的过程中温度不会发生变化. 因此, 压强和温度都保持不变, 初态和终态在 P - T 图上为同一点.

图 2-43

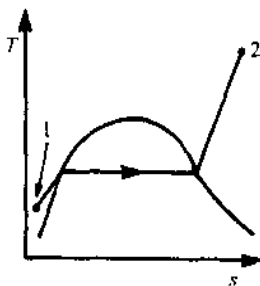


图 2-44

2.45 在恒定的压强下加热被压缩的液体直至成为过热蒸汽. (T - s 图)

解 见图 2-44. 在压缩液体范围和过热蒸汽范围的两条等压过程曲线大致沿 NE、SW 方向, 从饱和液体沿等温线变为饱和蒸汽.

2.46 一过热蒸汽在一刚性的容器中被冷却直至变为干饱和蒸汽. (T - s 图)

解 见图 2-45. 注意从 1→2 曲线的斜率比在等压下冷却要陡. (见题 4.79)

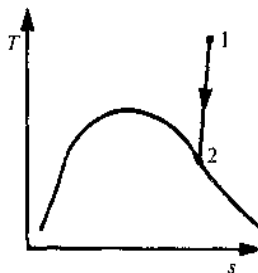


图 2-45

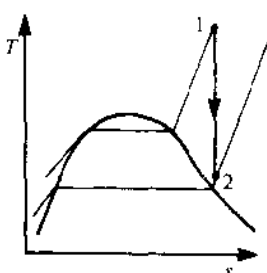


图 2-46

2.47 一过热蒸汽经历一等熵膨胀过程。(T-s 图)

解 见图 2-46。在题 2.45 中给出了单相的等压过程曲线,而在熵保持不变的膨胀过程中,压强必然下降,过程曲线如图所示。

2.48 过热蒸汽经历一等熵膨胀过程。(T-s 图)

解 见图 2-47。和题 2.47 一样,该过程压强也必然降低。可是,该过程(也称为节流过程)是不可逆的,因此其熵要增加,大致的方向如图所示。

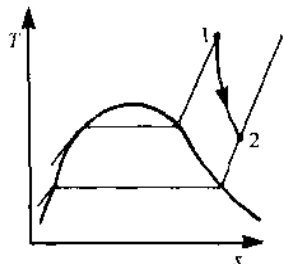


图 2-47

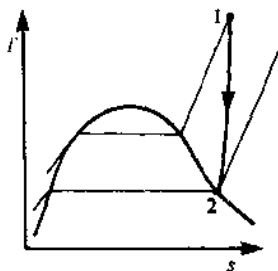


图 2-48

2.49 在一绝热容器中,过热蒸汽膨胀至熵减小的一个终态。(T-s 图)

解 虽然从逻辑上看该过程曲线应如图 2-48 所示从 1→2,但这样的过程将违背“熵增加原理” $\Delta s \geq \Delta Q/T$ 。因为容器是绝热的, $\Delta Q=0$ 。因此 $\Delta s \geq 0$,熵的改变量不可能是负的。

2.50 在一容器中过热蒸汽被无限缓慢地压缩,它与外部环境有能量的交换。(T-s 图)

解 见图 2-49、2-50。温度不发生变化,因而为压强增大,终态必定是从初态沿水平方向向左。会出现两种情形:图 2-49 中终态仍为过热蒸汽;图 2-50 表示终态为饱和蒸汽与液态混合物。注意负的熵变只有在非绝热的系统中可能出现。

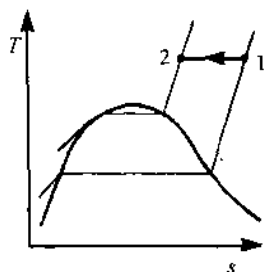


图 2-49

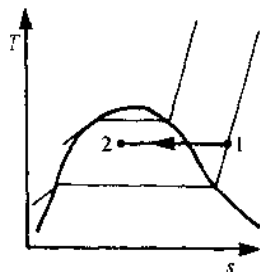


图 2-50

2.51 过热蒸汽等温压缩至饱和蒸汽。((log P)-h 图)

解 见图 2-51。如果终态的压强仍较低,路径 1→2 近视为一直线。

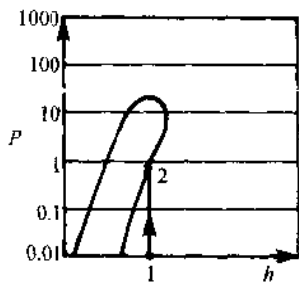


图 2-51

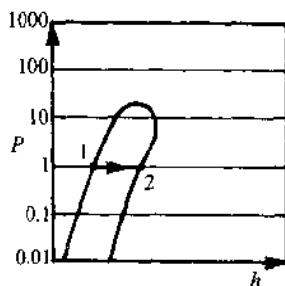


图 2-52

2.52 对饱和液体进行加热直至所有的液体刚好全部蒸发。在此过程中压强保持不变。((log P)-h 图)

解 见图 2-52.

2.53 饱和蒸汽被冷凝成为饱和液体, 终态的压强是初态压强的 10%. ($(\log P)-h$ 图)

解 见图 2-53.

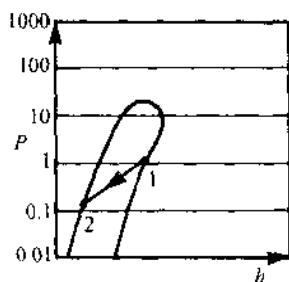


图 2-53

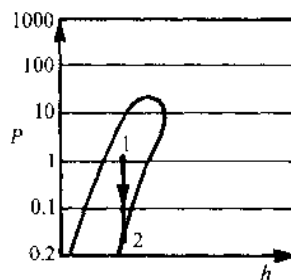


图 2-54

2.54 液体和饱和蒸汽的混合物经节流过程最终成为饱和蒸汽. ($(\log P)-h$ 图)

解 见图 2-54.

2.55 一饱和蒸汽经历一绝热压缩过程. ($(\log P)-h$ 图)

解 见图 2-55.

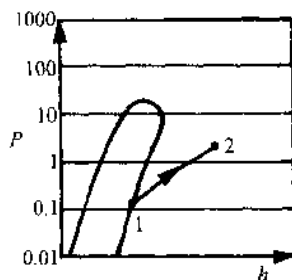


图 2-55

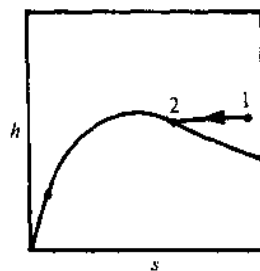


图 2-56

2.56 一过热蒸汽等温冷却至饱和蒸汽. ($(h-s)$ 图)

解 见图 2-56.

2.57 过热蒸汽在一定的压强下冷却成为饱和蒸汽 ($(h-s)$ 图)

解 见图 2-57.

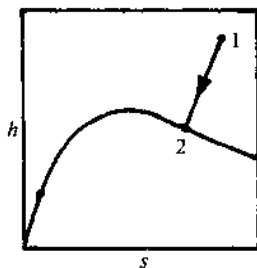


图 2-57

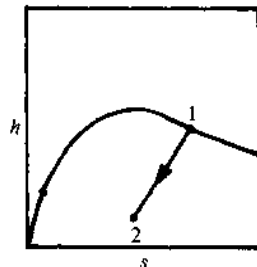


图 2-58

2.58 饱和蒸汽在恒定的温度下凝聚. ($(h-s)$ 图)

解 见图 2-58.

2.59 一饱和蒸汽, 初始状态与题 2.58 相同, 在恒定的压强下凝聚. ($(h-s)$ 图)

解 见图 2-58. 在焓熵图上, 等压和等温线在两相共存区域内是平行的, 因此在同样的初态下

等温冷却—饱和蒸汽与等压冷却该饱和蒸汽是沿同一路径进行的,与此形成鲜明对比的是,在过热蒸汽区域内等温过程与等压过程的路径大不相同(见题 2.56 和 2.57)。

- 2.60 在 $h-s$ 图(图 2-59)上画出下列两过程的路径。过程 1→2 将一气、液混合物经节流过程变为过热蒸汽,过程 3→4 将一过热蒸汽经不可逆的绝热膨胀直至成为饱和蒸汽。清楚地画出终态和路径。

解 见 图 2-60。

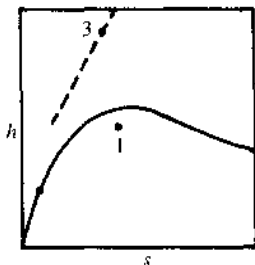


图 2-59

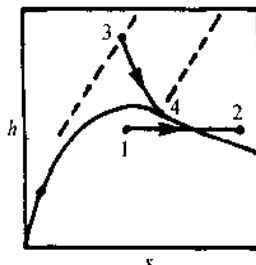


图 2-60

表列数据的获取

在题 2.61~2.93 中,讨论空气,引用的表见附录 B。

- 2.61^D 1bar, 200K 时的比体积是多少(m^3/kg)?

解 查表 B2, $T=200$ 时, $v=0.573$, 所以空气在 1bar, 200K 时, 空气的比体积是 $0.573\text{m}^3/\text{kg}$ 。

- 2.62^D 14.70psia, 80°F 时的比体积是多少(ft^3/lb_m)?

解 80°F = 540°R, 查表 B1, $T=540$, $v=13.61$, 所以空气在 14.70psia, 80°F 时的比体积为 $13.61\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 。

- 2.63^D 1bar, 200K 时的焓是多少(kJ/kg)?

解 查表 B2, $T=200$, $h=199.6$, 所以空气在 1bar, 200K 时的焓是 $199.6\text{kJ}/\text{kg}$ 。

- 2.64^D 14.70psia, 80°F 的焓是多少(Btu/lb_m)?

解 80°F = 540°R, 查表 B1, $T=540$, $h=129.1$, 所以空气在 14.70psia, 80°F 时的焓是 $129.1\text{Btu}/\text{lb}_m$ 。

- 2.65^D 1bar, 200K 时的熵为何值?

解 与题 2.61 和 2.63 查法相同, 可查得熵为 $6.459\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ 。

- 2.66^D 14.70psia, 80°F 时的熵为何值?

解 与题 2.62 和 2.64 查法相同, 可查得熵为 $1.6404\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。

- 2.67^D 求常压, 200K 时的比热。

解 在表 B2 中, $T=200$ 时, $c_p=1.008$, 所以常压(1bar), 200K 时的比热是 $1.008\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ 。

- 2.68^D 常压, 80°F 时的比热。

解 80°F = 540°R, 在表 B1 中, $T=540$ 时, $c_p=0.2403$, 所以在 14.70psia 的常压下, 80°F 的空气的比热为 $0.2403\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。

- 2.69^D 1bar, 380K 时的比体积。

解 查表 B2, $T=380$ 时, $v=1.091\text{m}^3/\text{kg}$ 。

- 2.70^D 1000°R, 14.70psia 时的比体积。

解 查表 B1, $T=1000$ 时, $v=25.22\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 。

- 2.71^D 什么温度下焓等于 $767.8\text{kJ}/\text{kg}$?

解 在表 B2 中, 查得 $h=767.8$ 时, $T=750\text{K}$ 。

2.72^D 什么温度下焓等于 369.5 Btu/lb_m?

解 查表 B1, $h = 369.5$ 时, $T = 1500^\circ\text{R}$. 若以华氏温度表示, $T = 1500 - 460 = 1040^\circ\text{F}$.

2.73^D 在什么温度下内能为 1209 kJ/kg?

解 在表 B2 中, 查得内能为 1209 时, $T = 1500$, 所以温度为 1500 K.

2.74^D 什么温度下内能为 368.1 Btu/lb_m?

解 在表 B1 中, $u = 368.1$ 时, $T = 2000^\circ\text{R}$.

2.75^D 空气在 1 bar, 450 K 时的比体积.

解 表 B2 中只有 440 K 和 460 K 时的 v 值 ($1.264 \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $1.320 \text{ m}^3/\text{kg}$). 运用线性内插法, 因为 450 处于 440 和 460 正中间, 所以 $v(1 \text{ bar}, 450 \text{ K}) = (1/2)(1.264 + 1.320) = 1.292 \text{ m}^3/\text{kg}$.

2.76^D 空气在 14.70 psia, 1050°R 时的比体积 (m^3/kg).

解 由表 B1 可查得 1000°R 和 1100°R 时的 v 值 ($25.22 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 和 $27.74 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$) 而 1050 处于 1000 和 1100 的正中间, 由线性内插法,

$$v(14.70 \text{ psia}, 1050^\circ\text{R}) = (1/2)(25.22 + 27.74) = 26.48 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

2.77^D 空气在 1 bar, 455 K 时的比体积 (m^3/kg)?

解 这里需用线性内插. 由表 B2 可知, $1.264 < v < 1.320$. 对应的温度变化量为 $460 - 440 = 20$, 而 455 K 的温度比 440 K 高 15 K. 所以比体积增量的比率为 $r = 15/20 = 3/4 = 0.75$, $v(1 \text{ bar}, 455 \text{ K}) + r\Delta v = 1.264 + 0.75(1.320 - 1.264) = 1.264 + 0.042 = 1.306 \text{ m}^3/\text{kg}$.

2.78^D 空气在 14.70 psia, 1075°R 时的比体积是多少 (ft^3/lb_m)?

解 需要用线性内插. 由表 B1 可见, v 介于 2.871 和 $3.014 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 之间, 对应的温度增量为 $1100 - 1000 = 100$ 而 1075°R 的温度比 1000°R 高 75°R , 所以, 比体积的增量比率为 $r = 75/100 = 0.75$, $v(14.70 \text{ psia}, 1075^\circ\text{R}) = v(14.70 \text{ psia}, 1000^\circ\text{R}) + r\Delta v = 25.22 + 0.75(27.74 - 25.22) = 25.22 + 1.89 = 27.11 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$.

2.79^D 另法求解题 2.75.

解 设空气在给定条件下满足理想气体状态方程 $Pv = RT$, 那么, 在常压 (1 bar), $v = cT$, 由表 B2, 在 $T = 440 \text{ K}$ 时, $v_{440} = 1.264 \text{ m}^3/\text{kg} = c_{440}(440 \text{ K})$, 所以 $c_{440} = 1264/440 = 2.873 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}$, 在 $T = 460 \text{ K}$ 时, $v_{460} = 1.320 \text{ m}^3/\text{kg} = c_{460}(460 \text{ K})$, 所以, $c_{460} = 2.870 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})$. 如果假设 c 随温度线性变化, 则 $c_{450} = 2.8715 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 而 $v_{450} = (2.8715 \times 10^{-3} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{K}))(450 \text{ K}) = 1.292 \text{ m}^3/\text{kg}$, 与题 2.75 完全一致. ($P-v$ 积的方法, 在内插法中特别有用, 特别是不需要以理想气体方程作为内插法的基础时是这样, 见题 2.97)

2.80^D 另法解题 2.78.

解 设空气在给定的条件下满足一定的状态方程, 如理想气体状态方程 $Pv = RT$, 则 $v = cT$ (有关状态方程及其适用条件见题 2.300 ~ 2.321) 由表 B1, $T = 1000^\circ\text{R}$ 时, $v_{1000} = 25.22 \text{ ft}^3/\text{lb}_m = c_{1000}(1000^\circ\text{R})$, 所以 $c_{1000} = 25.22/1000 = 0.02522 \text{ ft}^3/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; $T = 1100^\circ\text{R}$, $v_{1100} = 27.74 \text{ ft}^3/\text{lb}_m = c_{1100}(1100^\circ\text{R})$, 得 $c_{1100} = 0.02522 \text{ ft}^3/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. c 在所给范围内值不变, 因此可用它求出 $v_{1075} = (0.02522 \text{ ft}^3/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})(1075 \cdot ^\circ\text{R}) = 27.11 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, 与题 2.78 结果完全一致. ($P-v$ 积的方法, 在不需要以理想气体方程作为内插法的基础时特别有用, 见题 2.96)

2.81^D 空气在 1 bar, 298.15 K 时的熵是多少 ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)?

解 利用表 2 数据内插得

$$\begin{aligned} s^0 &= s_{280}^0 + r\Delta s^0 = 6.797 + (18.15/20)(6.867 - 6.797) \\ &= 6.797 + 0.063 = 6.860 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

2.82^D 空气在 14.70 psia, 77°F 时的熵是多少 ($\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$)?

解 77°F = 537°R, 由表 B1 内插,

$$s^0 = s_{520}^0 + r\Delta s^0 = 1.6311 + (17/20)(1.6404 - 1.6311) = 1.6311 + 0.0079 = 1.6390 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

2.83^D 什么温度下, 压强为 1 bar 的空气熵是 6.800 kJ/kg · K?

解 此题要由表 B2 的数据反向内插。即由方程 $s^0 = s_0^0 + r\Delta s^0$ 解出 r 。温度从 280K 变到 300K, $\Delta s^0 = 6.867 - 6.7997 = 0.0673 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 所以 $r = (s - s_0^0) / \Delta s^0 = 0.003 / 0.0673 = 0.0446\%$ 对应于 $s^0 - s_0^0$ 的温度增加值为 $r\Delta T = (0.0446)(300 - 280) \approx 0.9 \text{ K}$ (精确到 0.1K 比较合理), 所以所求温度为 $280 + 0.9 = 280.9 \text{ K}$ 。

2.84^D 什么温度下, 14.70psia 的空气中的熵为 $1.670 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$?

解 用表 B1 的数据反向内插; 即由方程 $s^0 = s_0^0 + r\Delta s^0$ 解出 r 。从 600°R 到 620°R ,

$$\Delta s^0 = 1.6736 - 1.6657 = 0.0079 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} \quad s^0 = 1.6657 \text{ Btu/lb}_m$$

所以

$$r = (s^0 - s_0^0) / \Delta s^0 = 0.0043 / 0.0079 = 0.5443$$

对应于 $s^0 - s_0^0$ 的温度增量是 $r\Delta T = (0.5443)(620 - 600) \approx 10.9^\circ\text{R}$ (精确到 0.1R 比较合理), 所以所求温度为 610.9°R 。

2.85^D 空气在 1bar, 300K 时的焓是多少 (kJ/kmol)?

解 要取焓的单位为 kJ/kmol , 表 B2 中 h 值须乘以空气的分子量, 由表 D1 (附录 D) 知, $M = 28.966 \text{ kg/kmol}$, 所以

$$H = Mh = (28.966 \text{ kg/kmol})(300.2 \text{ kJ/kg}) = 8696.0 \text{ kJ/kmol}$$

2.86^D 空气在 14.70psia, 80°F 时的焓是多少 ($\text{Btu/lb}_m \text{ mole}$)?

解 取 $\text{Btu/lb}_m \text{ mole}$ 作为焓的单位, 表 B1 中 h 须乘以空气的分子量, 由表 D1 (附录 D), $M = 28.966 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole}$ 而 $80^\circ\text{F} = 540^\circ\text{R}$, 所以

$$H = Mh = (28.966 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole})(129.1 \text{ Btu/lb}_m) = 3740.0 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$$

2.87^D 空气在 1bar, 300K 时的等体比热 c_v 等于多少 ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)? 设空气是理想气体。

解 由表 B2 得, $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 对理想气体, $c_p - c_v = R = R_u / M$ (见题 4.157 及 4.16), 而 $R_u = 8.31451 \text{ kJ/kmole} \cdot \text{K}$, 又由表 D1, $M = 28.966 \text{ kg/kmole}$, 所以

$$c_v = c_p - \frac{R_u}{M} = 1.005 - \frac{8.31451}{28.966} = 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

2.88^D 求空气在 14.70psia, 80°F 时的等体比热 c_v ($\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$), 设空气是理想气体。

解 与题 2.87 一样, $c_v = c_p - (R_u / M)$ 。由表 B1 得, $c_p = 0.2403 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。用热功当量 $778.16 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{Btu}$ 除以 $R_u = 1545.33 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{lb}_m \text{ mole} \cdot ^\circ\text{R}$, 给出 $R_u = 1.9859 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole} \cdot ^\circ\text{R}$ 。由表 D1 知, $M = 28.966 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole}$, 所以

$$c_v = 0.2403 - \frac{1.9859}{28.966} = 0.1717 \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{R}$$

2.89 空气在 1bar, 300K 时的等体比热 c_v 是多少 ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)? 设空气不一定是理想气体。

解 由表 B2, $c_v = c_p / k = 1.005 / 1.400 = 0.7179 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (可与题 2.87 结果比较)。

2.90 解释表 B1、B2 中 s^0, P_r, V_r 列的用途。

解 对半理想气体 (题 2.301) 的可逆过程, 题 2.324 中的热力学方程 (2) 可以积分得

$$\Delta s = \Delta s^0 - R \ln(P_2 / P_1) \quad (1)$$

式中 $s^0 \equiv \int c_p(T) dT / T$, 是温度的函数。借助于 s^0 , 可定义温度函数 $P_r \equiv \exp(s^0 / R)$ 。(显然, s^0 和 P_r 中只有 1 个需在表中列出。)

s^0 或 P_r 主要用于等熵 (可逆绝热) 过程。这时, (1) 式变成

$$s_2^0 - s_1^0 = R \ln(P_2 / P_1) \quad \text{或} \quad P_2 / P_1 = P_{r2} / P_{r1}$$

以相似的方式, 可以定义半理想气体等熵过程的温度函数 V_r , 使其满足 $V_2 / V_1 = V_{r2} / V_{r1}$ 。应当注意区分 P_r, V_r 与分别除以临界压强和体积后的参数值。

2.91 P_r 和 V_r 能表示成 T 的解析函数吗?

解 不能。它们与 T 的关系需用计算机进行数值计算。

2.92^D 空气在 1bar, 300K 时的压缩系数是多少?

解 摩尔压缩系数 Z 定义为一纯数 $PV / R_u T$ 。(对于理想气体, 所有情况下 $Z = 1.0000$), Z 不能

从表上直接查得,但可从表上数据计算得出.由表 B2,比体积 $v=0.861\text{m}^3/\text{kg}$,所以摩尔体积 $V=Mv$ ($28.966\text{kg}/\text{kmole}$)($0.861\text{m}^3/\text{kg}$)= $24.94\text{m}^3/\text{kmole}$. 利用 $R=8.31541\text{kJ}/\text{kmole}\cdot\text{K}$, $P=1\text{bar}=100\text{kN}/\text{m}^2$ 和 $T=300\text{K}$,可得

$$Z=\frac{(100\text{kN}/\text{m}^2)(24.94\text{m}^3/\text{kmole})}{(8.31541\text{kJ}/\text{kmole}\cdot\text{K})(300\text{K})}=0.9999$$

2.93^D 空气在 14.70psia, 80°F 时的摩尔压缩系数是多少?

解 根据题 2.92,空气在 14.70psia, 80°F= 540°R 时,由表 B1 给出 $v=13.61\text{ft}^3/\text{lb}_m$,摩尔体积为 $V=Mv=(28.966\text{lb}_m/\text{lb}_m\cdot\text{mole})(13.61\text{ft}^3/\text{lb}_m)=394.2\text{ft}^3/\text{lb}_m\cdot\text{mole}$. 由 $R_u=1545\text{ft}\cdot\text{lb}_f/\text{lb}_m\cdot\text{mole}\cdot^\circ\text{R}$, $P=(14.70\text{lb}_f/\text{in}^2)(144\text{in}^2/\text{ft}^2)=2117\text{lb}_f/\text{ft}^2$,可得

$$Z=\frac{PV}{R_u T}=\frac{(2117\text{lb}_f/\text{ft}^2)(394.2\text{ft}^3/\text{lb}_m\cdot\text{mole})}{(1545\text{ft}\cdot\text{lb}_f/\text{lb}_m\cdot\text{mole}\cdot^\circ\text{R})(540^\circ\text{R})}=1.0003$$

题 2.94~2.99 讨论氟里昂(R12),引用表见附录 C.

2.94^D 1bar, 300K 时的比体积是多少(m^3/kg)?

解 由表 C6 可查得,1bar 的压强下,温度为 300K 时, $v=0.2024\text{m}^3/\text{kg}$.

2.95^D 15psia, 40°F 时的比体积是多少(ft^3/lb_m)?

解 由表 C5 可查得, $P=15\text{psia}$, $T=40^\circ\text{F}$ 时, $v=2.877\text{ft}^3/\text{lb}_m$.

2.96^D 用表 C6 的数据内插,求 R12 在 7bar, 325K 时的比体积(m^3/kg): (a) 用 v 的数据内插. (b) 用 Pv 的数据内插.

解 (a) 需用二次内插,因为压强和温度均不能直接查得.

$$v(7\text{bar}, 320\text{K})=0.0331+\frac{7-6}{8-6}(0.0238-0.0331)=0.0284\text{m}^3/\text{kg}$$

$$v(7\text{bar}, 330\text{K})=0.0345+\frac{7-6}{8-6}(0.0250-0.0345)=0.0298\text{m}^3/\text{kg}$$

所以

$$v(7\text{bar}, 325\text{K})=\frac{1}{2}[v(7\text{bar}, 320\text{K})+v(7\text{bar}, 330\text{K})]=0.0291\text{m}^3/\text{kg}$$

(b) 实际上,体积不是压强的线性函数,应该考虑 Pv 的乘积.若 R12 可视为理想气体, Pv 将随温度线性变化而与压强的变化无关.由表 C6 知,以 $\text{bar}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$ 为单位,则

$$Pv(6\text{bar}, 320\text{K})=6(0.0331)=0.1986, \quad Pv(6\text{bar}, 330\text{K})=0.2070$$

所以由温度的线性内插得

$$Pv(6\text{bar}, 325\text{K})=\frac{1}{2}(0.1986+0.2070)=0.2028 \quad (1)$$

类似地有

$$Pv(8\text{bar}, 320\text{K})=0.1904, \quad Pv(8\text{bar}, 330\text{K})=0.2000$$

所以

$$Pv(8\text{bar}, 325\text{K})=\frac{1}{2}(0.1904+0.2000)=0.1952 \quad (2)$$

再由式(1)、(2)内插得

$$Pv(7\text{bar}, 325\text{K})=\frac{1}{2}(0.2028+0.1952)=0.1990$$

除以压强得

$$v(7\text{bar}, 325\text{K})=\frac{0.1990\text{bar}\cdot\text{m}^3/\text{kg}}{7\text{bar}}=0.0284\text{m}^3/\text{kg}$$

与(a)所得结果相差 2.5%.

2.97^D 条件改变为 125psia, 150°F, 用表 C5 重解题 2.96.

解 (a) $v(125\text{psia}, 140^\circ\text{F})=\frac{1}{2}(0.479+0.298)=0.388\text{ft}^3/\text{lb}_m$

$$v(125\text{psia}, 160^\circ\text{F})=\frac{1}{2}(0.501+0.316)=0.409\text{ft}^3/\text{lb}_m$$

所以

$$v(125\text{psia}, 150^\circ\text{F}) = \frac{1}{2}(0.388 + 0.409) = 0.399\text{ft}^3/\text{lb}_m$$

(b) 以 $\text{psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lb}_m$ 为单位, $Pv(100\text{psia}, 140^\circ\text{F}) = 47.9$, $Pv(100\text{psia}, 160^\circ\text{F}) = 50.1$. 所以, $Pv(100\text{psia}, 150^\circ\text{F}) = 49.0$. 类上, $Pv(150\text{psia}, 140^\circ\text{F}) = 44.7$, $Pv(150\text{psia}, 160^\circ\text{F}) = 47.4$. 所以, $Pv(150\text{psia}, 150^\circ\text{F}) = 46.1$. 而 $Pv(150\text{psia}, 150^\circ\text{F}) = \frac{1}{2}(49.0 + 46.1) = 47.6$, 最后得

$$v(125\text{psia}, 150^\circ\text{F}) = \frac{47.6\text{psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lb}_m}{125\text{psia}} = 0.381\text{ft}^3/\text{lb}_m$$

此值与(a)结果相差 4.7%.

2.98 由表 C2, 求 R-12 饱和蒸汽在 10bar 压强下的比体积.

解 由表 C4 可查得结果为 $0.0176\text{m}^3/\text{kg}$. 不过, 常常只有温度表, 所以, 由表 C2 知, 310K, 8.859bar 时, $v_g = 0.0199$; 而在 320K, 11.29bar 时, $v_g = 0.0155$. 设线性内插适用, 则 $P = 10\text{bar}$ 时,

$$T = 310 + \frac{10 - 8.86}{11.29 - 8.86}(320 - 310) = 314.69\text{K}$$

在此温度下

$$v_g = 0.0199 + \frac{314.69 - 310}{320 - 310}(0.0155 - 0.0199) = 0.0178\text{m}^3/\text{kg}$$

这与从压强表查得的 $0.0176\text{m}^3/\text{kg}$ 相差 1.1%.

为了得到更精确的结果, 计算中需做二点变化, 首先, 蒸汽压随温度的变化不是线性关系而是对数关系, 需用题 4.83~4.118 所采取的方法. 准确温度是 314.9K, 而不是 314.7K. 其次, 饱和蒸汽的比体积随温度和压强的变化都不是线性的, 设 Pv 是线性函数较好(见题 2.96(b)).

2.99 什么温度($^\circ\text{F}$)下饱和 R12 蒸汽的比体积为 $1\text{ft}^3/\text{lb}_m$?

解 由表 C1 知, $20 < T < 30^\circ\text{F}$, 设线性内插适用, 则

$$T = 20 + \frac{1 - 1.099}{0.919 - 1.099}(10) = 25.5^\circ\text{F}$$

由表 C3 知, $30 < P < 40\text{psia}$, 在此范围内, $11.1 < T < 25.9^\circ\text{F}$.

仍用线性内插法, 得

$$T = 11.1 + \frac{1.000 - 1.321}{0.987 - 1.321}(25.9 - 11.1) = 25.3^\circ\text{F}$$

两种算法结果相差 0.2°F .

干度

2.100 (a) 定义两相(气液)混合物质的干度. (b) 导出三个等效的方程将表示气液混合物特性的量 ϕ_{mix} 与饱和液体的特征量 ϕ_f 和饱和蒸汽的特征量 ϕ_g 联系起来.

解 (a) 干度 x 是在气液混合物中饱和蒸汽的质量百分比. 因此, 如果 m 表示混合物质的总质量, 则液体的质量 $m_f = (1-x)m$, 气体的质量 $m_g = xm$.

(b) 令 ϕ 表示任一比热力学量(如每单位质量). 总量的“守恒”可表示为

$$m\phi_{\text{mix}} = m_f\phi_f + m_g\phi_g$$

因而

$$\phi_{\text{mix}} = (1-x)\phi_f + x\phi_g \quad (1)$$

定义在气化过程中特征量的改变, $\phi_{fg} \equiv \phi_g - \phi_f$, 上式可表示为如下的等价形式:

$$\phi_{\text{mix}} = \phi_f + x\phi_{fg} \quad (2)$$

$$\phi_{\text{mix}} = \phi_g - (1-x)\phi_{fg} \quad (3)$$

2.101^D 水的气液混合物在 100°C 时的比体积(m^3/kg)是多少? 混合物的干度是 10%.

解 由表 A2 查得在 373K 下液态水和饱和水蒸气的比体积 v_f 和 v_g , 代入题 2.100 的(1)式, 得

$$v_{\text{mix}} = (1-0.1)(0.001044) + (0.1)(1.679) = 0.1688\text{m}^3/\text{kg}$$

2.102^D 计算水的气液混合物在 212°F 下的比体积(ft^3/lb_m), 混合物的干度是 90%.

解 由表 A1 查得数据代入题 2.100 的(1)式,得

$$v_{\max} = (1-0.09)(0.01672) + (0.09)(26.8) = 24.1217 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

可是,上式中代入的饱和蒸汽的比体积 v_g 精确到小数点后一位,因此结果可写为

$$v_{\max} = 24.12 \pm 0.04 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

- 2.103 水的气液混合物在 10bar 下的比体积(m^3/kg)是多少?混合物的干度是 40%.

解 由表 A4 查得数据代入题 2.100 的(1)式,得

$$v_{\max} = (1-0.40)(1.27 \times 10^{-3}) + (0.40)(0.154) = 0.0783 \text{ m}^3/\text{kg}$$

可是,由于表中的 v_g 仅精确到小数点后第三位,结果应近似等于 $0.078 \text{ m}^3/\text{kg}$.

- 2.104 计算气液混合物在 500°F 温度下的比体积(ft^3/lb_m),混合物的干度为 50%.

解 由表 A1 查得数据代入题 2.100 的(1)式,得

$$v_{\max} = (1-0.50)(0.02043) + (0.50)(0.675) = 0.3477 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

因为代入数据 v_g 的最大误差 ≈ 0.0004 ,结果应表示为

$$v_{\max} = 0.3477 \pm 0.0002 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

- 2.105 若 $10 \text{ kg} \cdot \text{K}$ 的气液混合物在 5 bar 的压力下占据的体积为 1 m^3 . (a)混合物的干度是多少? (b)液态的体积是多少?

解 (a)
$$v_{\max} = (1 \text{ m}^3)/(10 \text{ kg}) = 0.10 \text{ m}^3/\text{kg}$$

从表 A4 查得: $v_f = 1.094 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_g = 0.375 \text{ m}^3/\text{kg}$,代入题 2.100 的(1)式,解得

$$x - 0.265 = 26.5\%$$

(b)
$$V_f = m_f v_f = (1-x) m v_f = (1-0.265)(10 \text{ kg})(1.094 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.008 \text{ m}^3$$

- 2.106 若 10 lb_m 水的气液混合物在 100°F 温度下的体积为 200 ft^3 , (a)混合物的干度是多少? (b)蒸汽的体积(ft^3)是多少?

解 (a)
$$v_{\max} = (200 \text{ ft}^3)/(10 \text{ lb}_m) = 20 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

从表 A1 查得: $v_f = 0.01613 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $v_g = 350 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$,将这些数据代入题 2.100 的(1)式,解得干度

$$x = 0.0571 = 5.71\%$$

(b)
$$V_g = m_g v_g = x m v_g = (0.0571)(10 \text{ lb}_m)(350 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) = 199.85 \text{ ft}^3$$

- 2.107 通过计算 V_g 来检验题 2.105(b).

解
$$V_g = m_g v_g = x m v_g = (0.265)(10 \text{ kg})(0.375 \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.994 \text{ m}^3$$

题 2.105(b)给出的结果是 $V_g = 0.992 \text{ m}^3$.

- 2.108 通过计算 V_f , 检验题 2.106(b).

解

$$V_f = m_f v_f = (1-x) m_f v_f = (1-0.0571)(10 \text{ lb}_m)(0.01613 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) = 0.1521 \text{ ft}^3$$

由题 2.106(b)得出的结果是 $V_f = 0.15 \text{ ft}^3$.

- 2.109^D 一容积为 2 m^3 的容器内有 5bar 压力下的液态水 0.5 m^3 , 剩余空间充满水蒸气. (a)容器内水的混合物的干度是多少? (b)容器内物质的总质量多少?

解 (a)从关系式 $V_f = (1-x) m v_f$ 和 $V_g = x m v_g$ 可得

$$x = \frac{v_f V_g}{v_f V_g + v_g V_f}$$

因此,利用表 A4 中的比体积,可得

$$x = \frac{(1.094 \times 10^{-3})(1.5)}{(1.094 \times 10^{-3})(1.5) + (0.375)(0.5)} = 8.7 \times 10^{-3} = 0.87\%$$

(b)
$$m = \frac{V_g}{x v_g} = \frac{1.5 \text{ m}^3}{(8.7 \times 10^{-3})(0.375 \text{ m}^3/\text{kg})} = 461 \text{ kg}$$

- 2.110^D 一容器容积为 75 ft^3 , 内有 80psia 压强下的液态水 20 ft^3 . 其余空间充满水蒸气. (a)容器内混合物的干度是多少? (b)容器内物质的总质量是多少?

解 (a)利用题 2.109 和表 A3,可得

$$x = \frac{(0.0176)(55)}{(0.0176)(55) + (5.472)(20)} = 8.72 \times 10^{-3} = 0.87\%$$

$$(b) \quad m = \frac{V_g}{x v_g} = \frac{55 \text{ ft}^3}{(8.72 \times 10^{-3})(5.472 \text{ ft}^3/\text{lb}_m)} = 1147 \text{ lb}_m$$

- 2.111 一容器内有 20°C 的液态水 100kg 和气 kg 的饱和水蒸气,若在此温度下饱和水蒸气的此体积为 57.78m³/kg,计算(a)容器的容积;(b)水分含量(%).

解 (a) 20°C 即 293.15K 时,由表 A2 可知 $v_f \approx 1.002 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, 因而 $V_f = m_f v_f = (100 \text{ kg})(1.002 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}) = 0.1002 \text{ m}^3$. 水蒸气 $V_g = m_g v_g = (5 \text{ kg})(57.78 \text{ m}^3/\text{kg}) = 288.9 \text{ m}^3$. 总体积 $V = V_f + V_g = 0.1 + 288.9 = 289 \text{ m}^3$

(b) 水分含量是指混合物中液态水的质量占总量的百分比,它是

$$m_f / (m_g + m_f) = 100 / (100 + 5) = 0.952 = 95.2\%$$

- 2.112 一容器内有 250lb_m 的液态水和 10lb_m 的饱和水蒸气,压强为 500psia. 计算 (a) 容器的容积;(b)干度(%).

解 (a) 总体积是 $V = V_f + V_g = m_f v_f + m_g v_g$. 利用表 A3, 可得

$$V = (250 \text{ lb}_m)(0.0198 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) + (10 \text{ lb}_m)(0.928 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) = 14.23 \text{ ft}^3$$

(b) 干度是指蒸汽质量在混合物中所占总质量的百分比.

$$x = 10 / (10 + 250) = 0.0385 = 3.9\%$$

- 2.113^D 在什么温度和压强下题 2.109 的系统可得到 50%干度的混合物?

解 容器内水物质的总质量为 461kg. 若干度达到 50%, 则 $m_f = m_g = 461/2 = 230.5 \text{ kg}$. 总体积必须满足

$$2m^3 = m_f v_g + m_g v_g = 230.5(v_f + v_g)$$

所以

$$v_f + v_g = 2m^3 / 230.5 \text{ kg} = 0.00868 \text{ m}^3/\text{kg}$$

结果只能用尝试法来求得. 在临界点, $v_f = v_g = 0.003170 \text{ m}^3/\text{kg}$ (表 A2), 所以

$$v_f + v_g = 0.00634 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ —— 太小}$$

在 620K,

$$v_f + v_g = 0.00171 + 0.0094 = 0.0111 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ —— 太大}$$

因此 $620 < T < 647\text{K}$. 现在从表 A4 可知在 200bar (639.0K) 时,

$$v_f = 0.0020, \quad v_g = 0.0059, \quad v_f + v_g = 0.0079 \text{ —— 太小}$$

因此温度必定处在 639K 和 647K 之间, 压强在 200bar 和 220bar 之间. 在此我们只能精确到这一步.

- 2.114^D 在什么温度(°F)和压强(psia)下题 2.110 的系统可得到 50%干度的混合物?

解 容器内水物质的总质量为 1147lb_m. 若现在干度为 50%, 则 $m_f + m_g = 1147/2 = 573.5 \text{ lb}_m$. 总体积 $75 \text{ ft}^3 = m_f v_f + m_g v_g = 573.5(v_f + v_g)$, 所以 $v_f + v_g = 75/573.5 = 0.1308 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 该问题只能用试探法求解. 在临界点, $v_f = v_g = 0.0506 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ (表 A1), 因而 $v_f + v_g = 0.1012 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ —— 结果太小. 在 7000°F 时, $v_f + v_g = 0.0366 + 0.075 = 0.112 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ —— 太小. 在 695.4°F 或 3000psia, 表 A3 给出 $v_f + v_g = 0.0343 + 0.085 = 0.119 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ —— 太小. 在 680°F 时, 和为 0.1887 —— 太大. 因此最后温度一定处在 680°F 和 695°F 之间, 压强处于 2200psia 和 3000psia 之间, 在此只能精确到这一步.

- 2.115 一刚性容器内有 100°C 的水的气液混合物. 加热可使其达到临界状态. (a) 该混合体的终态温度(K)和压强(bar)是多少? (b) 该混合体最初的压强(bar)和干度是多少? (c) 初态时液体体积占容器总体积的百分比是多少?

解 (a) 由蒸汽表和表 D1 的数据求平均可得, $T = T_c = 647.2 \text{ K}$, $P = P_c = 220.9 \text{ bar}$.

(b) 在刚性容器中, $V = \text{常量}$. 同样质量 m 也为常量. 因此 $v_{\text{mix}} = V/m = 0.00314 \text{ m}^3/\text{kg}$ 也是常量. 它就是临界状态下的值. 求解

$$v_{\text{mix}} = 0.00314 = (1 - x_1)v_{f1} + x_1 v_{g1} = (1 - x_1)(0.001044) + x_1(1.679)$$

可得初态的干度 $x_1 = 0.00125 = 0.13\%$. 在 100°C 时, $0 < x < 1$ 的任何干度, $P = 1.0133 \text{ bar}$.

(c) 若取总质量为 1kg, 则,

$$m_{g1} = x_1 m = 0.00125(1) = 0.00125 \text{ kg}$$

$$m_{f1} = (1 - x_1)m = 0.99875(1) = 0.99875 \text{ kg}$$

由此可得

$$V_{f1} = m_{f1} v_{f1} = 0.99875(0.001044) = 1.043 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$V_{g1} = m_{g1} v_{g1} = 0.00125(1.679) = 2.099 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

因此

$$V_{f1} / (V_{f1} + V_{g1}) = 1.043 / (1.043 + 2.099) = 0.3320$$

- 2.116 一刚性容器内有水的气液混合物, 压强为 500 psia, 加热最终达到临界状态. (a) 该混合体的最终温度 (°F) 和压强 (psia)? (b) 该混合体的初态温度 (°F) 和干度是多少? (c) 初态蒸汽的体积占容器总体积的百分比?

解 (a) 将蒸汽表和表 D1 所得数据求平均可得, $T = T_c = 705.25^\circ\text{F}$, $P = P_c = 3203 \text{ psia}$.

(b) 在刚性容器中 $V = \text{常量}$, 同样, 质量 $m = \text{常量}$. 因此比体积 $v_{\text{mix}} = V/m = 0.0503 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 保持不变. 解方程

$$v_{\text{mix}} = 0.0503 = (1 - x_1)v_{f1} + x_1 v_{g1} = (1 - x_1)(0.02043) + x_1(0.675)$$

可得 $x_1 = 0.0456 = 4.56\%$, 在 500 psia 压强下, 任何干度 $0 < x < 1$ 范围内, $T = 467.0^\circ\text{F}$.

(c) 若取水物质的总质量为 1 lb_m , 则 $m_{g1} = x_1 m = 0.0456(1) = 0.0456 \text{ lb}_m$, $m_{f1} = (1 - x_1)m = 0.9544(1) = 0.9544 \text{ lb}_m$. 由此可得

$$V_{f1} = m_{f1} v_{f1} = 0.9544(0.0198) = 0.0189 \text{ ft}^3$$

$$V_{g1} = m_{g1} v_{g1} = 0.0456(0.928) = 0.0423 \text{ ft}^3$$

因此初态时蒸汽的体积百分比为

$$V_{g1} / (V_{g1} + V_{f1}) = (0.0423) / (0.0189 + 0.0423) = 0.6558 = 65.58\%$$

- 2.117^D 在一刚性的容器中 400 K 的干饱和蒸汽被冷却到 350 K. (a) 末态压强 (bar) 是多少? (b) 求容器中终态时各组份的含量?

解 (a) 假设终态是气液两相混合体, 其压强应该是水在 350 K 时的饱和蒸汽压 0.4163 bar.

注意到 $v_{\text{mix}} = \text{常量} = v_{g1}(\text{初态}) = 0.731 \text{ m}^3/\text{kg}$. 因而

$$0.731 = (1 - x_2)v_{f2} + x_2 v_{g2} = (1 - x_2)(1.027 \times 10^{-3}) + x_2(3.846)$$

解得 $x_2 = 0.1899 \approx 19\%$, 因为 $0 < x_2 < 1$, 终态确为气液两相混合体.

(b) 液态质量百分比为 81%, 气态为 19%.

- 2.118^D 在一刚性容器中干饱和蒸汽从 250°F 降至 160°F. (a) 终态压强是多少 (psia)? (b) 终态时容器中各组份的含量?

解 (a) 假设终态是气液两相混合共存态, 压强应为水在 160°F 时的饱和蒸汽压 4.743 psia. 为

确定末态, 注意到 $v_{\text{mix}} = \text{常量} = v_{g1}(\text{初态}) = 13.8 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 因此, $13.8 = (1 - x_2)v_{f2} + x_2 v_{g1} = (1 - x_2)(0.01640) + x_2(77.2)$, 解得 $x_2 = 0.1785 \approx 17.9\%$. 因为 $0 < x_2 < 1$, 终态确为气液共存的状态.

(b) 液态的含量为 82.1%, 气态为 17.9%.

- 2.119^D 一刚性容器中有 400 K 的干饱和蒸汽, 将其冷却到什么温度可使其成为干度为 25% 的气液混合体?

解 因为

$$v_{\text{mix}} = \text{常数} = v_{g1} = 0.731 \text{ m}^3/\text{kg}$$

可得终态时

$$0.731 = 0.75v_{f2} + 0.25v_{g2}$$

作为一级近似, v_{f2} 比 v_{g2} 小得多, 将其忽略, 可得 $0.25v_{g2} \approx 0.731$, $v_{g2} \approx 2.924 \text{ m}^3/\text{kg}$. 查表可看出该 v_g 所对应的温度在 350 K 至 360 K 之间. 若用 V_g 线性内插

$$T = 350 + \frac{2.924 - 3.846}{2.645 - 3.846}(10) \approx 358 \text{ K}$$

- 2.120^D 一刚性容器中有 250°F 的干饱和蒸汽, 将其冷却到什么温度 (°F) 可使其成为干度为 25% 的气液混合物?

解 因为

$$v_{\text{mix}} = \text{常数} = v_{g1} = 13.8 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

可得终态时

$$13.8 = 0.75v_{f2} + 0.25v_{g2}$$

在一级近似下, v_{f2} 比 v_{g2} 小得多, 可将其忽略, 得 $0.25v_{g2} \approx 13.8$, $v_{g2} \approx 55.2 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 查表可看出该 v_g 所对应的温度在 160°F 和 180°F 之间, 若用线性内插法可得

$$T = 160 + \frac{55.2 - 77.2}{50.2 - 77.2}(20) \approx 168^\circ\text{F}$$

压缩系数

- 2.121 (a) 对于真实气体, 压缩系数的定义; (b) 压缩系数有何用处, 如何应用? (c) 临界点蒸汽的压缩系数是多少? (i) 用 SI 制蒸汽表的数据; (ii) 用 USCS 制蒸汽表的数据; (iii) 用其他的数据.

解 (a) $Z = Pv/RT$, 这儿 v 是气体的比体积, $R (= R_u/M)$ 是比气体常数.

(b) 压缩系数表示任何给定条件下的气体与理想气体接近的程度. 对理想气体, $Pv = RT$, 所以 $Z = 1$; 对实际气体 $Pv = ZRT$. 在这本书的问题中, 压缩系数主要用于将理想气体的体积修正为实际气体的体积(见第 4 章).

(c) (i) 用表 A2 的临界点的参量及题 2.172 中的 R 的数据可得

$$Z_c = \frac{P_c V_c}{RT_c} = \frac{(221.2 \times 10^2 \text{ kN/m}^2)(0.003170 \text{ m}^3/\text{kg})}{(0.46151 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(647.3 \text{ K})} = 0.2347$$

(ii) 取表 A1 中临界点的参量及题 2.173 中 R 的数值可得

$$Z_c = \frac{P_c v_c}{RT_c} = \frac{(3206 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2)(0.0506 \text{ ft}^3/\text{lb}_m)}{(85.775 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})[(705.4 + 459.7)^\circ\text{R}]} = 0.2340$$

(iii) 从表 D1 得 $Z_c = 0.234$

临界点

- 2.122 如何从饱和热力学特性表来确定临界点的温度或压强, 假设临界点在这些表中未特别注明?

解 因为临界点温度是物质能同时存在液相和气相的最高温度, 它必定是图 2-61 中的点所表示的状态, 在该点 $v_f = v_g$. 因而可以通过查找饱和特性表中 v_f 和 v_g 的值相同的条件确定临界点, 或寻找 $h_f = h_g$ 或 $s_f = s_g$ 的条件.

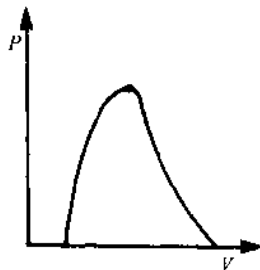


图 2-61

- 2.123 简要解释: (a) 临界区域变异; (b) 临界点附近多大的范围有明显的变异效应?

解 (a) 当一系统接近临界点时, 经典的热力学理论不再适用; 由经典理论导出的结果产生很大的偏差.

(b) 反常效应随着向临界点的靠近呈对数关系; 也即极小影响会引起系统特性很大的改变. 温度和压强大致在临界点附近百分之几的范围内有明显的反常效应. 因此, 对于水蒸气, 反常区在 $6.35 < P < 3500 \text{ pisa}$. 反常的程度随物质的性质而变化.

- 2.124 给出两个能够代表接近临界点的特性的简单公式.

解 (1) 对于饱和液体和饱和蒸汽密度的平均值可表示为 $(\rho_f + \rho_g)/2 \approx \rho_c - a|T_c - T|$, 这里 $a > 0$, ρ_c 是临界点密度的通值.

(2) 汽化焓的 Watson 关系是 $h_{fg} \approx a|1 - T/T_c|^n$, 其中 $n \approx 0.378$.

等压比热

- 2.125 给出在等压下热容量的公式.

解 当一物质在给定压强下被加热, 实验发现所需的热量与温度的升高量和物质的质量成正比. 因此 $Q_p = mc_p \Delta T$, 这儿比例系数 c_p 称为等压比热.

2.126 表述题 2.125 中比热 c_p 的单位。(a)SI 制;(b)USCS 制。

解 (a) 在 SI 制中 Q 的单位是 kJ, m 是 kg, ΔT 是 K, 所以 c_p 的单位是 kJ/kg · K。

(b) 在 USCS 制中, Q 的单位是 Btu, m 是 lb_m, ΔT 是 °R, 所以 c_p 的单位是 Btu/lb_m · °R。

2.127 “我的旧物理书上说液态水的等压比热是 1Btu/lb_m · °R, 我需要把温度转化为绝对温度吗?”

解 没有必要: 作为温度上升量 1°F = 1°R。

2.128^D 由气体的能量均分定理得到单原子气体的等压摩尔热容量是 $(5/2)R_u$ 。推导氩气的等压比热 c_p , 以 kJ/kg · K 为单位。

解 分子量为(表 D1) $M = 39.948 \text{ kg/kmol}$ 。

所以

$$c_p = \frac{(5/2)R_u}{M} = \frac{(5/2)(8.3145 \text{ kJ/kmole} \cdot \text{K})}{39.948 \text{ kg/kmol}} = 0.5203 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

2.129^D 参考题 2.128, 计算氩气的 c_p , 以 Btu/lb_m · °R 为单位。

$$\begin{aligned} \text{解} \quad c_p &= \frac{(5/2)R_u}{M} = \frac{(5/2)(1.9859 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{mole} \cdot \text{°R})}{39.948 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole}} \\ &\approx 0.125 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{°R} \end{aligned}$$

2.130^D 由气体的能量均分定理得到在等压下双原子气体的摩尔热容量是 $(7/2)R_u$, 求空气的比热 c_p , 以 kJ/kg · K 为单位, 并与表 B2 的结果比较。

解 从表 D1 查得 M_{air} 的值

$$c_p = \frac{(7/2)R_u}{M_{\text{air}}} = \frac{(7/2)(8.3145 \text{ kJ/kmole} \cdot \text{K})}{28.966 \text{ kg/kmole}} = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

与表 B2 的结果完全一致。

2.131^D 参照题 2.130 计算空气的比热 c_p , 以 Btu/lb_m · °R 为单位。

$$\begin{aligned} \text{解} \quad c_p &= \frac{(7/2)R_u}{M} = \frac{(7/2)(1.9859 \text{ Btu/lb}_m \text{ mol} \cdot \text{°R})}{28.966 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mol}} \\ &= 0.2399 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{°R} \end{aligned}$$

在 $80 + 460 = 540^\circ\text{R}$, 表 B1 c_p 的值是 $0.2403 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{°R}$, 误差为 0.17%。

2.132^D ASHRAE1976 年出版的“致冷剂的热物理性质”一书给出, 在 260~610K 之间致冷剂 R729 在 1bar 的恒定压强下比热的关系式为

$$c_p = 1.04466 = 3.15967 \times 10^{-4} T + 7.07909 \times 10^{-7} T^2 - 2.7034 \times 10^{-10} T^3$$

这儿 c_p 是以 kJ/kg · K 为单位, T 以 K 为单位。(a)致冷剂 R729 是什么? 为什么以此数字表示? (b)由该公式推得的 c_p 在 300, 450, 600K 时的值是多少? 计算结果精确到小数点后第三位。(c)将所得结果与表 B2 的数据进行比较。

解 (a) 致冷剂 R729 是空气, 该数字是将无机气体的分子量加 700 并精确到整数位。

(b) $c_p(300\text{K}) \approx 1.006 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; $c_p(450\text{K}) \approx 1.021 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; $c_p(600\text{K}) \approx 1.051 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

(c) 在表 B2 中相应的值分别为 1.005, 1.021 和 1.051 kJ/kg · K。

2.133^D 用题 2.132 的关系式。(a)计算气态空气在 0, 300 和 600 °F 下的比热 c_p (Btu/lb_m · °R), 保留四位小数;(b)将所得结果与表 B1 中的数据比较。

解 (a) 要用题 2.132 中的关系式, 华氏温度(°F)必须转化为开尔文温度(K): $0^\circ\text{F} = 255.38\text{K}$; $300^\circ\text{F} = 422.05\text{K}$; $600^\circ\text{F} = 588.72\text{K}$ 。代入公式可得 $c_p(255.38\text{K}) = 1.0056 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; $c_p(422.05\text{K}) = 1.0171 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; $c_p(588.72\text{K}) = 1.0487 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。这些值是以 SI 为单位制, 该书中指出要得到以 Btu/lb_m · °R 为单位的比热容, 上述数据必须乘以 0.239006。由此可得 c_p 的值分别为 0.2403, 0.2431 和 0.2506 Btu/lb_m · °R。

(b) 将华氏温标转化为兰氏(Rankine)温标并查表 B1, 可得 c_p 的值分别为 0.2402, 0.2427 和 0.249 Btu/lb_m · °R。

2.134^D ASHRAE1976 年出版的“致冷剂的热物理性质”一书中给出: 在 100~600K 的温度范

围内, R12 在压强趋于零时的等压比热公式为

$$c_p = 0.116661 + 2.37994 \times 10^{-3} T - 2.94788 \times 10^{-6} T^2 + 1.37282 \times 10^{-9} T^3$$

式中 c_p 单位是 $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, T 的单位是 K 。(a) 根据公式, $T=300\text{K}$ 时, R12 的等压比热是多少($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)? (b) 比较你的计算结果与查表 C6 所得数据。

解 (a) $c_p = 0.116661 + 0.71398 - 0.26531 + 0.03707 \approx 0.602 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

(b) 在 $1\text{bar}, 305\text{K}$ 时, $c_p = (\partial h / \partial T)_p \approx (\Delta h / \Delta T)_p = (578.2 - 572.1) / 10 = 0.61 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

在 $1\text{bar}, 295\text{K}$ 时, $c_p = (\partial h / \partial T)_p \approx (572.1 - 565.9) / 10 = 0.62 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

因此, $1\text{bar}, 300\text{K}$ 时, $c_p \approx 0.615 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。为了得到压强趋于零时, 比热的更加精确的结果, 需根据表上 $1.5, 2, 2.5, \dots \text{bar}$ 时的数据外推。

2. 135^D 参见题 2. 134。(a) 当温度为 80°F 时, 由公式所给出的 R12 的等压比热是多少? (b) 与查表 C5 结果比较如何?

解 (a) $80^\circ\text{F} = 299.83\text{K}$, 因此,

$$c_p = 0.11661 + 0.71358 - 0.26501 + 0.03700 = 0.60218 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

若像 2. 133 题一样用 USCS 单位, $c_p = 0.239(0.60218) = 0.1439 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。

(b) 10psia 时, 从 $60 \sim 80^\circ\text{F}$, $c_p \approx (92.55 - 89.60) / (100 - 80) = 0.1475 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。因此, 80°F 时, $c_p \approx 0.1465 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。为得到压强趋于零时比热的精确结果, 应由表中 $15, 20, 25, \dots \text{psia}$ 时的数据外推获得。

2. 136 1976 年 ASHRAE 出版的“致冷剂的热物理性质”中给出了致冷剂 R718 在 1bar 的压强下的等压比热公式为

$$c_p = 8.13705 - 3.73435 \times 10^{-2} T + 7.48227 \times 10^{-5} T^2 - 4.95562 \times 10^{-8} T^3$$

式中 c_p 单位是 $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, T 单位是 K 。(a) $\bar{5}$ 的意思是什么? (b) 由公式, $T=500\text{K}$ 时 c_p 等于多少? (c) 试将计算结果与表 A5 查得结果相比较。

解 (a) $\bar{5}$ 的意思是: 如果取近似, 舍去而不入。

(b) $c_p = 8.13705 - 18.67195 + 18.70568 - 6.19453 \approx 1.976 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

(c) 1bar 时, $T=490\text{K}$,

$$c_p = (2h / \partial T)_p \approx (\Delta h / \Delta T)_p = (2928.7 - 2889.9) / (500 - 480) = 1.98 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$T=525\text{K}$, $c_p = (3028 - 2929) / (550 - 500) = 1.98 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

因此, $T=500\text{K}$, $c_p \approx 1.98 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

2. 137^D 参见题 2. 136, 450°F 时, 公式给出的 c_p 是多少?

解 与题 2. 133(a) 解法一样, 求得 $c_p \approx 0.4732 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。

2. 138^D 450K 时, 1bar 的水蒸气的比热是多少($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)?

解 可用定义 $c_p = (\partial h / \partial T)_p \approx (\Delta h / \Delta T)_p$ 来求。由表可查得 450K , 压强为 1bar 时的焓值并计算变化率 $(\Delta h / \Delta T)_p$ 。

$$h(1\text{bar}, 440\text{K}) = 2809.9 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \quad h(1\text{bar}, 460\text{K}) = 2849.4 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

所以,

$$c_p \approx (2849.4 - 2809.9) / (460 - 440) = 1.975 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

2. 139^D 650°F , 14.7psia 下, 蒸汽的等压比热是多少?

解 由定义, $c_p = (\partial h / \partial T)_p \approx (\Delta h / \Delta T)_p$ 。查出表中 650°R , 14.7psia 时的焓值, 并计算

$$h(14.7\text{psia}, 600^\circ\text{F}) = 1335 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

$$h(14.7\text{psia}, 700^\circ\text{F}) = 1384 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$$

因此,

$$c_p \approx (1384 - 1335) / (700 - 600) = 0.49 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$$

2. 140^D 500K , 1bar 时蒸汽的等压比热是多少($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)?

解 可由定义 $c_p = (\partial h / \partial T)_p \approx (\Delta h / \Delta T)_p$ 求解。不过, 此题比题 2. 138 稍复杂。因为 500K 不介于表上两值中间, 所以需计算 500K 上、下的 c_p 值再内插。由表知, 1bar 时, $h(480\text{K}) = 2889.0 \text{ kJ/}$

kg, $h(500\text{K}) = 2928.7\text{kJ/kg}$. 因此,

$$c_p(490\text{K}) \approx (2928.7 - 2889.0)/(500 - 480) = 1.985\text{kJ/kg}$$

同法求得,

$$c_p(525\text{K}) \approx (3028 - 2929)/(550 - 500) = 1.980\text{kJ/kg}$$

线性内插给出

$$c_p(500\text{K}) \approx 1.985 + \frac{10}{35}(-0.005) = 1.984\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$$

2.141^D 14.7psia, 700°F 时蒸汽的等压比热是多少?

解 用定义 $c_p = (\partial h / \partial T)_p \approx (\Delta h / \Delta T)_p$ 来求. 与题 1.40 一样, 此题计算稍繁, 因为 700°F 不是表中温度的中间值. 现计算如下: 14.7bar 时, $h(600^\circ\text{F}) = 1335\text{Btu/lb}_m$; $h(700^\circ\text{F}) = 1384\text{Btu/lb}_m$; 因此, 在 600~700°F 的范围内, c_p 的平均值为

$$\Delta h / \Delta T = (1384 - 1335)/(700 - 600) = 0.49\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$$

再考虑 700~800°F 的范围,

$$\Delta h / \Delta T = (1433 - 1384)/(800 - 700) = 0.49\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$$

两结果相等, 所以 0.49Btu/lb_m · °F 即为所求.

2.142 画一草图, 显示某种物质在气、液、固三态下比热随温度的变化情况. 标 *s* 代表固体, *l* 代表液体, *g* 代表气体, 并标出熔点和临界温度.

解 见图 2-62.

2.143 (a) 爱因斯坦的固体热容量理论公式是什么? (b) 这一理论哪里不妥? (c) 德拜做了什么改进?

解 (a) $c_v = 3R x^2 e^x / (e^x - 1)^2$, $x \equiv \theta / T$, θ 是一特征温度.

(b) 它所给出的 S 形曲线比固体的实验曲线值低, 且在低温 ($< 20\text{K}$ 或 $< 40^\circ\text{R}$) 下趋于零太快. 该理论对固体晶格结构的粒子的振幅无大小限制, 所以导致不准确.

(c) 德拜限制了晶格振动的最高频率, 公式因而变成

$$c_p = 9R(T/\theta)^3 \int_0^{\theta/T} x^4 (e^x - 1)^{-2} dx.$$

2.144 解释肖脱基效应.

解 这是一相变名词. 例如, 一氧化碳分子的构象从头尾结构 ($\text{CO}, \text{CO}, \text{CO}, \dots$) 转变为交变构象 ($\text{CO}, \text{OC}, \text{CO}, \dots$), 变化所需的能量在 c_v - T 图上显示为曲线的隆起. 见图 2-63.

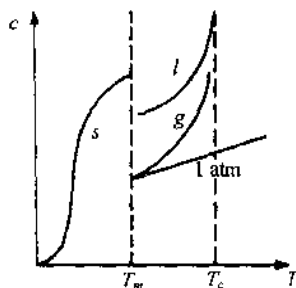


图 2-62

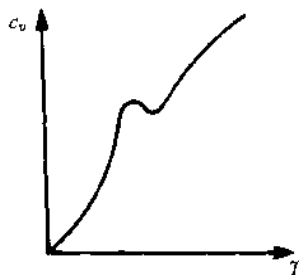


图 2-63

汽化焓

2.145 (a) 定义汽化焓(即潜热), 给出该物理量的单位; (b) SI 制; (c) USCS 制.

解 (a) 汽化焓 h_{fg} 定义为单位质量的某种物质从饱和液体变成饱和气体所需要的热量.

(b) kJ/kg.

(c) Btu/lb_m.

2.146 计算 R12 的汽化潜热. (a) 300K 时为多少 kJ/kg? (b) 80°F 时为多少 Btu/lb_m. 所得结果是否自洽?

解 (a) 300K 时, 由表 C2 得 $h_{fg} = h_g - h_f = 563.5 - 426.0 = 137.5\text{kJ/kg}$; 由表 C1 得, $h_{fg} = h_g - h_f = 85.28 - 25.37 = 59.91\text{Btu/lb}_m$, 换算成 SI 制单位,

$$(59.91 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m}) (1.0551 \frac{\text{kJ}}{\text{Btu}}) (\frac{1\text{lb}_m}{0.4536\text{kg}}) = 137.0\text{kJ/kg}$$

(b) 因为 300K = 81.31°F, h_{fg} 值应很接近. 计算表明, 相差约 3.6%, 是自洽的.

2.147 计算水的汽化潜热. (a) 450K 时为多少 kJ/kg? (b) 350°F 时为多少 Btu/lb_m? 所得结果是否一致?

解 由表 A2 得, 450K 时, $h_{fg} = h_g - h_f = 2771 - 749 = 2022 \text{ kJ/kg} = 869.3 \text{ Btu/lb}_m$, 由表 A1 知, $h_{fg} = h_g - h_f = 1193 - 322 = 871 \text{ Btu/lb}_m$.

因为 $350^\circ\text{F} = 449.83\text{K}$, 一结果应基本相等, 实际相差 0.2%.

2.148 “高中物理书中讲蒸汽的潜热是 536 cal/g , 这一结果是否准确?”

解 略有误差. 根据热功当量 4.1847 J/cal , $536 \text{ cal/g} = 2243 \text{ kJ/kg}$, 比蒸汽表值低 $14/2257 = 0.6\%$.

2.149 证明临界点的汽化焓(即潜热)一定是零.

解 最简单的证明方法是运用题 4.75(a) 中的一个麦克斯韦关系式: $\Delta P/\Delta T = \Delta s/\Delta v$. 这里 $\Delta P/\Delta T$ 取极限即为蒸汽压曲线的斜率 dP/dT , 从图 2-29 和图 2-30 可以看出, 在临界温度右侧, $dP/dT = 0$. 因为 $\Delta s = (\Delta P/\Delta T)\Delta v$, 在临界点, $v_g = v_f = v_c$, 所以 $\Delta v = v_g - v_f = 0$. 因此, $(\Delta s)_{T=T_c} = 0$, 而 $\Delta s = \Delta Q/T$, 故 $0 = (\Delta s)_{T=T_c} = \Delta Q/T_c = h_{fg}/T_c$, $h_{fg} = 0$.

溶解焓

2.150 (a) 定义溶解焓(或潜热)并给出其单位; (b) 0°C 的冰的溶解热是多少 kJ/kg ? (c) 30°F 的冰的溶解热是多少 Btu/lb_m ? (d) (b)、(c) 结果是否一致.

解 (a) 溶解焓 h_{if} 定义为单位质量的物质从固体转化成液体[压强(或温度)保持不变]所需要的热量. 其单位与汽化焓相同.

(b) 由表 A2 得, $0^\circ\text{C} = 273.15\text{K}$ 时, $Q = h_{if} = h_f - h_s = 0 - (-333.5) = 333.5 \text{ kJ/kg}$.

(c) 由表 A1 得, 32°F 时, $Q = h_{if} = h_f - h_s = 0.0 - (-143.3) = 143.3 \text{ Btu/lb}_m$.

(d) $(143.3 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m}) (1.0551 \frac{\text{kJ}}{\text{Btu}}) (\frac{1 \text{ lb}_m}{0.4536 \text{ kg}}) = 333.3 \text{ kJ/kg}$. 与 (b) 结果基本一致, 仅差 0.2 kJ/kg .

升华焓

2.151 (a) 定义升华焓(或潜热)并给出其单位. (b) 0°C 的冰蒸发需要多少热量(kJ/kg)? (c) 32°F 的冰蒸发需要多少热量(Btu/lb_m)? (d) 能否找出其他方法得到 (b)、(c) 的结果?

解 (a) 升华焓 h_{sw} 定义为单位质量的物质从固态转变为气态[压强(或温度)不变]时所需的热量, 所以其单位即为能量单位.

(b) 由表 A2, 在 $0^\circ\text{C} = 273.15\text{K}$ 时, $Q = h_{sw} = h_g - h_s = 2502 - (-333.5) \approx 2836 \text{ kJ/kg}$.

(c) 由表 A1, 32°F 时, $Q = h_{sw} = h_g - h_s = 1076 - (-143.3) \approx 1219 \text{ Btu/lb}_m$.

(d) (b)、(c) 结果是直接计算固体升华为气体得到的, 也可以想像固体先变为液体, 再变为气体, 所需能量即为溶解和汽化能量之和. 因此, 在 SI 制中, $Q = h_{if} + h_{fg} = 143.3 + 1076 \approx 1219 \text{ Btu/lb}_m$. 此二步转变仅在三相点发生.

熵的变化

2.152 (a) 给出熵变与热量转移和温度之间的基本关系, 并写出常压下某种物质被加热或冷却时的熵变; (b) 无相变; (c) 有相变.

解 (a) $\Delta s = \Delta Q/T$ 或 $\Delta s = \Delta q/T$

(b) $\Delta Q = m\Delta h$ 所以 $\Delta s = \int mcdT/T = m \int cdT/T$

(c) $\Delta Q = m\Delta h = mL$ ($\Delta h =$ 焓变, $L =$ 相变潜热) 所以 $\Delta s = m\Delta h/T = mL/T$

2.153^D 表 B2 显示, 在 $240 \sim 300\text{K}$ 范围内, 空气的比热是常数, 为 $1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 空气在常压下从 250K 加热至 300K , 在此过程中, 空气的比熵变是多少? 你的结果与表中 s^0 值是否一致? [由题 2.90 式(1)知, 等压过程 $\Delta s = \Delta s^0$]

解 由题 2.152(b) 知, $\Delta s = \Delta s/m = \int cdT/T$. 若 c 是一常数, 积分得 $\Delta s = c \ln(T_2/T_1) = (1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(300/250) = 0.1832 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 表 B2 给出 $\Delta s^0 = s_{300}^0 - s_{250}^0 = 6.867 - 6.683 =$

0.184 kJ/kg · K. 两结果仅相差 0.4%.

- 2.154^D 由表 B1 知, 空气的比热在 460 ~ 520°R 范围内等于 0.2402 Btu/lb_m · °R. 若将空气从 450°R 等压加热至 520°R, 空气的熵变是多少 (Btu/lb_m · °R)? 你的结果与表中 s^0 值是否一致? [由题 2.90 式(1)知, 等压过程: $\Delta s = \Delta s^0$]

解 由题 2.152(b) 知, $\Delta s = \Delta s/m = \int c dT/T$, 若 c 为常数, 积分得 $\Delta s = c \ln(T_2/T_1) = (0.2402 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) \ln(520/450) = 0.0253 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 表 B1 给出 $\Delta s^0 = s_{520}^0 - s_{450}^0 = 1.6217 - 1.5964 = 0.0253 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 两结果完全一致.

- 2.155^D 用题 2.132 中的关系式计算空气在 1 bar 的压强下从 260 K 等压加热至 600 K 的比熵变, 并将结果与表中 s^0 值比较.

$$\Delta s = \int c dT/T = 1.04466 \int dT/T - (3.15967 \times 10^{-4}) \int dT + (7.07909 \times 10^{-7}) \int T dT - (2.70340 \times 10^{-10}) \int T^2 dT$$

逐项积分并代入上、下限值, 得

$$\begin{aligned} \Delta s &= 1.04466 \ln \frac{600}{260} - (3.15967 \times 10^{-4})(600 - 260) \\ &\quad + (7.07909 \times 10^{-7}) \frac{600^2 - 260^2}{2} - (2.70340 \times 10^{-10}) \frac{600^3 - 260^3}{3} \\ &= 0.85176 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

表 B2 给出 $\Delta s^0 = s_{600}^0 - s_{260}^0 = 7.574 - 6.723 = 0.851 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (正是因为避免了多项式的积分, 所以表中 s^0 和 P_r 的值被广泛使用).

- 2.156^D 用题 2.132 中的关系式计算空气在 14.7 psia 的常压下从 0 ~ 600°F 的比熵变, 并与表中 s^0 值比较.

解 0°F = 255.38 K, 600°F = 588.72 K, 与题 2.155 一样,

$$\begin{aligned} \Delta s &= 1.04466 \ln \frac{588.72}{255.38} - (3.15967 \times 10^{-4})(588.72 - 255.38) \\ &\quad + (7.07909 \times 10^{-7}) \frac{588.72^2 - 255.38^2}{2} - (2.70340 \times 10^{-10}) \frac{588.72^3 - 255.38^3}{3} \\ &= 0.84988 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

与题 2.133 一样, 乘以 0.239006, 即得 $\Delta s = 0.20313 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 表 B1 给出 $\Delta s = s_{1060}^0 - s_{460}^0 = 1.805 - 1.602 = 0.203 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 查表避免了积分运算, 所以得到广泛应用.

- 2.157^D 用题 2.134 中的关系式计算气态的 R12 在 1 bar 的常压下从 250 加热至 350 K 的比熵变, 并将结果与过热 R12 气体的表值比较.

$$\Delta s = \int c dT/T = 0.116661 \int dT/T + (2.37994 \times 10^{-3}) \int dT - (2.94788 \times 10^{-6}) \int T dT + (1.37282 \times 10^{-9}) \int T^2 dT$$

积分得

$$\begin{aligned} \Delta s &= 0.116661 \ln \frac{350}{250} + (2.37994 \times 10^{-3})(350 - 250) \\ &\quad - (2.94788 \times 10^{-6}) \frac{350^2 - 250^2}{2} + (1.37282 \times 10^{-9}) \frac{350^3 - 250^3}{3} \\ &= 0.20127 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

表则给出 $s_{350} - s_{250} = 4.803 - 4.593 = 0.210 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 与上面结果相差 4.3%, 原因是 R12 在给定的温度范围内不是理想气体, 所以 1 bar 时的比热与零压强时不同.

- 2.158^D 用题 2.134 中的关系式计算气态的 R12 在 15 psia 的压强下从 0° 加热至 100 °F 的比熵变, 并与过热 R12 表值相比较.

解 温度的上下限分别是 255.38 K (= 0°F) 和 310.94 K (= 100°F), 与上题相似

$$\Delta s = 0.116661 \ln \frac{310.94}{255.38} + (2.37994 \times 10^{-3})(310.94 - 255.38)$$

$$-(2.94788 \times 10^{-6}) \frac{310.94^2 - 255.38^2}{2} - (1.37282 \times 10^{-9}) \frac{310.94^3 - 255.38^3}{3} \\ = 0.11495 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

与题 2.135 一样,上面结果乘以 0.239006,得

$$\Delta s = 0.02747 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

而由表得 $s_{100} - s_0 = 0.2059 - 0.1775 = 0.0284 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 相差 3.2%。这一差别是因为在所给温度范围内 R12 不是理想气体,所以 15psia 时的比热与零压强时不等。

2.159^D (a) 100°C 的水蒸发时的熵变是多少(kJ/kg·K)? (b) 用相应的焓变计算。

解 (a) 由表 A2 得, $\Delta s = s_{fg} = s_g - s_f = 7.356 - 1.307 = 6.049 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

(b) 由题 2.152(c), $\Delta s = h_{fg}/T = [(2676 - 419) \text{ kJ/kg}]/(373.15 \text{ K}) = 6.049 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

2.160^D (a) 212°F 的水蒸发时的熵变是多少(Btu/lb_m·°F)? (b) 用相应的焓变计算。

解 (a) 由表 A1 知,

$$\Delta s = s_{fg} = s_g - s_f = 1.757 - 0.312 = 1.445 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$$

(b) 由题 2.152(c),

$$\Delta s = h_{fg}/T = [(1151 - 180) \text{ Btu/lb}_m]/[(460 + 212)^\circ\text{R}] \\ = 1.445 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} (\text{per } ^\circ\text{R} = \text{per } ^\circ\text{F})$$

2.161^D (a) 0°C 的冰蒸发时的熵变是多少(kJ/kg·K)? (b) 利用升华、溶解、蒸发的焓变计算此熵变。

解 (a) 由表 A2,

$$\Delta s = s_w = s_g - s_s = 9.158 - (-1.221) = 10.379 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

(b) 由于 $\Delta s = \Delta h/T$, 所以

$$\Delta s = \frac{\Delta h_{sf} + \Delta h_{fs}}{T} = \frac{[0 - (-333.5)] + (2502 - 0)}{273.15} = 10.383 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

2.162^D (a) 32°F 的冰蒸发时的熵变是多少(Btu/lb_m·°R)? (b) 用升华、溶解、蒸发时的焓变计算熵变。

解 (a) 由表 A1,

$$\Delta s = s_w = s_g - s_s = 2.187 - (-0.292) = 2.479 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

(b) 利用关系式 $\Delta s = \Delta h/T$, 得

$$\Delta s = \frac{\Delta h_w}{T} = \frac{h_g - h_s}{T} = \frac{1076 - (-143)}{(32 + 460)} = 2.478 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

也可假设冰先熔解,后蒸发,这样

$$\Delta s = \frac{\Delta h_{sf} + \Delta h_{fg}}{T} = \frac{[0 - (-143.3)] + (1076 - 0)}{(32 + 460)} = 2.478 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

2.163^D 下列有关固态(冰)的数据是从表 A2 摘录的:

T/K	240	260	273.15
$h_i/(\text{kJ/kg})$	-400.1	-360.5	-333.5
$S/(\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$	-1.478	-1.323	-1.221
$c/(\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$	1.857	2.013	2.116

以上数据是否自洽?

解 $\Delta h = \int c dT$, $\Delta s = \int c dT/T$, 需要确定 c 是 T 的什么函数, 设函数为多项式, 因为只有三组数据, 所以只有三种形式 $c = a$ (明显不对), $c = a + bT$, $c = a + bT + CT^2$ 可以计算, 若 $c = a + bT$, 那么, 由前二组数据得

$$b = \frac{\Delta c}{\Delta T} = \frac{2.013 - 1.857}{260 - 240} = 0.0078 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}^2$$

从后二组数据得

$$b = \frac{2.116 - 2.013}{273.15 - 260} = 0.0078 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}^2$$

b 为常数, 因此线性拟合就够了, 计算 a 值如下:

$$a = c - bT = 1.857 - 0.0078(240) = -0.015 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

和

$$a = c - bT = 2.116 - 0.0078(273.15) = -0.015 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

因此

$$c \approx -0.015 + 0.0078T$$

c 的单位是 $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, T 的单位是 K .

从 $T_1 = 240\text{K}$ 变至 $T_2 = 273.15\text{K}$,

$$\begin{aligned} \Delta h &= \int_{T_1}^{T_2} c dT = a(T_2 - T_1) + \frac{b}{2}(T_2^2 - T_1^2) \\ &= (-0.015)(273.15 - 240) + \frac{0.0078}{2}(273.15^2 - 240^2) = 65.84 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

而由表得 $(-333.5) - (-400.1) = 66.6 \text{ kJ/kg}$; 结果相差 1.2%. 类上有

$$\begin{aligned} \Delta s &= \int_{T_1}^{T_2} \frac{C}{T} dT = a \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{b}{2}(T_2 - T_1) \\ &= -0.015 \ln \frac{273.15}{240} + 0.0078(273.15 - 240) = 0.2567 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

由表得 $(-1.221) - (-1.478) = 0.257 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 结果相差也是 1.2%.

2.164^D 下列是从表 A1 中抽得的固相(冰)的数据:

$T(^{\circ}\text{F})$	0	10	20	30	32
$h(\text{Btu/lb}_m)$	-158.9	-154.2	-149.3	-144.4	-143.3
$s(\text{Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R})$	-0.325	-0.314	-0.304	-0.294	-0.292
$c(\text{Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R})$	0.472	0.483	0.494	0.505	0.506

这些值是否自治?

解 与上题一样先求 c . 可以看出, 温度 T 每增加 10°F , c 增加 0.011, 因此, 线性拟合有效, 设 $c = a + bT$, 则 $b = 0.0011 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$. 由第一组数据求 $a = c - bT = 0.472 - 0.0011(0 + 460) = -0.034 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$, 因此, 线性拟合方程是

$$c \approx -0.034 + 0.0011T$$

c 的单位是 $\text{Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$, T 的单位是 $^{\circ}\text{R}$.

代入 $T_1 = 460^{\circ}\text{R}$, $T_2 = 492^{\circ}\text{R}$, 及题 2.163 的公式中的 a, b , 得

$$\begin{aligned} \Delta h &= (-0.034)(492 - 460) + \frac{0.0011}{2}(492^2 - 460^2) = 15.667 \text{ Btu/lb}_m \\ \Delta s &= -0.034 \ln \frac{492}{460} + 0.0011(492 - 460) = 0.0329 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R} \end{aligned}$$

上述结果与表得结果 15.50 Btu/lb_m 和 $0.033 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$ 分别相差 0.4% 和 0.30%.

2.165^D 由题 2.163 的结果, 冰在 $240 \sim 273.15\text{K}$ 之间的平均比热 \bar{c} 是多少 (kJ/kg)?

解 如果线性拟合 $c(T) = a + bT$ 有效, 则 $\bar{c} = \frac{1}{2}[c(T_2) + c(T_1)] = \frac{1}{2}[2.116 + 1.857] = 1.987 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 如果用焓变求 \bar{c} , 则有 $\Delta h = \bar{c}\Delta T$, $\bar{c} = \Delta h/\Delta T = (66.6 \text{ kJ/kg})/(33.15 \text{ K}) = 2.009 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 如果用熵变求 \bar{c} , 则有 $\Delta s = \bar{c} \ln(T_2/T_1)$, 即 $\bar{c} = \Delta s/\ln(T_2/T_1) = (0.257 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})/0.12938 = 1.98 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

2.166^D 由题 2.164 的结果, 0°F 至 32°F 之间的冰的平均比热 \bar{c} 是多少 (Btu/lb_m)

解 设线性关系 $c(T) = a + bT$ 成立, 则 $\bar{c} = \frac{1}{2}[c(T_2) + c(T_1)] = \frac{1}{2}(0.506 + 0.472) = 0.4989 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$. 如果用焓变求 \bar{c} , 则有 $\Delta h = \bar{c}\Delta T$, $\bar{c} = \Delta h/\Delta T = (15.6 \text{ Btu/lb}_m)/(32^{\circ}\text{R}) = 0.4875 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$. 如果用熵变求 \bar{c} , 则 $\Delta s = \bar{c} \ln(T_2/T_1)$, 或 $\bar{c} = \Delta s/\ln(T_2/T_1) = 0.034 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}/0.06725 = 0.5056 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$.

气体常数(纯净气体)

2.167 有人说每种物质在 USCS 制中有 4 个气体常数, 试解释之.

解 严格地讲,在任一单位制中,一种物质只有 2 个气体常数:普适气体常数 R_u 和比气体常数 R , R_u 与 1 mole 的任意一种物质对应,而 $R=R_u/M$ (M =物质的摩尔质量),是单位质量物质的气体常数,在量纲方面, $R=[\text{能量}]/[\text{摩尔} \cdot \text{温度}]$;在 USCS 制中,能量单位为 $\text{ft} \cdot \text{lb}_f$ (功的单位)或 Btu (热量单位),转换系数为 $778.16 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}$,因此 R_u 和 R 均有二种形式:

$$R_u = 1545.33 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot \text{mole} \cdot ^\circ\text{R} = 1.9859 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot \text{mole} \cdot ^\circ\text{R} \quad (1)$$

$$R = (1545.33/M) \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = (1.9859/M) \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R} \quad (2)$$

式(2)中, M 以 $\text{lb}_m/\text{lb}_m \cdot \text{mole}$ 计量。

2.168 给出 SI 制中空气的气体常数。

解 在 SI 制中,热量和功的单位相同,均为焦耳,由表 D1 知,空气的 $M=28.966 \text{ kg}/\text{kmol}$,因此

$$R_u = 8.31451 \text{ kJ}/\text{kmole} \cdot \text{K}$$

$$R = \frac{8.31451}{28.966} = 0.28704 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

2.169 在 USCS 制中,空气的比气体常数是多少?

解 由题 2.167 式(2)和表 D1 知,

$$R = 53.350 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = 0.06856 \text{ Btu}/(\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})$$

2.170 在 SI 制中, R_{12} 的比气体常数是多少?

解 由表 D1 得

$$R = R_u/M = 8.31451/120.910 = 0.06877 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

2.171 在 USCS 制中, R_{12} 的比气体常数是多少?

解 由题 2.167 式(2)和表 D1 得

$$R = 12.781 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = 0.016425 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

2.172 在 SI 制中,蒸汽的比气体常数是多少?

解 由表 D1(对水),

$$R = R_u/m = 8.31451/18.016 = 0.46151 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

2.173 在 USCS 制中,蒸汽的比气体常数是多少?

解 由题 2.167 式(2)和表 D1(对水),有

$$R = 85.775 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = 0.11023 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

2.174^D “我忘了如何导出 SI 制中的气体常数,而你的表显示 $c_p = 1.005 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$, $c_v = 0.718 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$,你能从这些数据导出气体常数吗?”

解 可以.假设空气是理想气体,则

$$R = c_p - c_v = 1.005 - 0.718 = 0.287 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

可与题 2.168 结果进行比较。

2.175^D “我忘了如何导出 USCS 制中的气体常数,而你的表显示 $c_p = 0.240 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $c_v = 0.171 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$,你能由此导出气体常数吗?”

解 可以.假设空气是理想气体,则

$$R = c_p - c_v = 0.240 - 0.171 = 0.069 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

可将结果与题 2.169 比较。

2.176^D 下表给出了空气在 300K 的常温下的热力学数据,试从这些数据求空气的比气体常数为多少($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)?

P/bar	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	0.0859	0.0428	0.0285	0.0214	0.0171	0.0142	0.0117	0.0107	0.0095	0.0086

解 压强趋向于零时,任一气体均呈现理想气体的行为,即有

$$\lim_{P \rightarrow 0} P v = R T$$

因此,我们建构下表

P/bar	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$Pv/(\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg})$	0.859	0.856	0.855	0.856	0.855	0.852	0.819	0.856	0.855	0.860

并外推至压强趋于零(剔除 70bar 时的反常值),可得 $RT \approx 0.856 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$ (可画图求),所以

$$R \approx \frac{85.6 \text{ kJ/kg}}{300 \text{ K}} = 0.285 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

可与题 2.168 比较.

2.177^D 下表给出了空气在 540°R 时的一些热力学数据,由这些数据求空气的比气体常数.

$P/(\text{lb}_f/\text{in}^2)$	14.7	20	40	60	80	100
$\rho/(\text{lb}_m/\text{ft}^3)$	0.07347	0.1000	0.2001	0.3003	0.4005	0.5008

解 设压强趋于零时呈理想状态,

$$\lim_{P \rightarrow 0} (P/\rho) = RT$$

因此,构建下表

$P/(\text{lb}_f/\text{in}^2)$	14.7	20	40	60	80	100
$P/144\rho/(\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m)$	200.1	200.0	199.9	199.8	199.75	199.7

外推至压强趋于零, $RT \approx 144(200.1) = 28814 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$

$$R \approx \frac{28814 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m}{540^\circ\text{R}} = 53.359 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

与题 2.169 比较.

2.178^D 由表 C6 求 350K 时 R 的比气体常数为多少(kJ/kg · K)?

解 有关数据为

P/bar	1	1.5	2.0	2.5	3	4	5	6	8	10
$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	0.2382	0.1579	0.1177	0.0936	0.0776	0.0575	0.0451	0.0377	0.0272	0.0211

设压强趋于零时呈理想状态,

$$\lim_{P \rightarrow 0} Pv = RT$$

因此,构建下表

P/bar	1	1.5	2.0	2.5	3	4	5	6	8	10
$Pv/(\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg})$	0.2382	0.2369	0.2354	0.2340	0.2328	0.2300	0.2270	0.2262	0.2176	0.2110

与题 2.176 的数据比较可见, Pv 与 P 的关系有所改变,表明在 350K, R12 是真实气体,取表中相邻的二个 Pv 值之间的差值(也可画图),可估算出在零压强时的 Pv 值,得

$$RT \approx 0.2410 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg} = 24.10 \text{ kJ/kg}$$

所以

$$R \approx \frac{24.10 \text{ kJ/kg}}{350 \text{ K}} = 0.0686 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

与题 2.170 比较.

2.179^D 由表 C5 求 100°F 时 R12 的比气体常数为多少($\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$)?

解 与上题相同,给出温度为 560°R 时的下表

$P/(\text{lb}_f/\text{in}^2)$	10	15	20	25	30	4	50	50	80	100
$v/(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	4.908	3.252	2.424	1.927	1.596	1.181	0.932	0.766	0.557	0.431
$144^{-1}Pv/(\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m)$	49.08	48.78	48.48	48.18	47.88	47.24	46.60	45.96	44.56	43.10

取上表中二相邻 Pv 值之差,或画图得 $RT \approx 144(49.68) = 7154 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$,

$$R \approx \frac{7154 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m}{560^\circ\text{R}} = 12.77 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

与题 2.171 比较.

2.180^D 由表 A5 求温度 500K 的蒸汽的比气体常数为多少 kJ/kg · K?

解 与前题一样,写出温度为 500K 时的下表

$P/(\text{bar})$	1	1.5	2.0	2.5	3	4	5	6	8	10
$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	2.998	1.529	1.144	0.913	0.760	0.567	0.452	0.375	0.278	0.221
$Pv/(\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg})$	2.298	2.294	2.288	2.283	2.280	2.268	2.260	2.250	2.224	2.210

外推 Pv 值至零压强, 得

$$Pv \approx 2.307 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg} = 230.7 \text{ kJ/kg}$$

即得

$$R \approx \frac{230.7 \text{ kJ/kg}}{500 \text{ K}} = 0.4614 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

与题 2.172 比较.

2.181^D 由表 A3 求 1000°F 的蒸汽的比气体常数为多少 ($\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$)?

解 与前一题一样, 写出温度为 1460°R 时的下表

$P/(\text{lb}_f/\text{in}^2)$	1	1.5	2	2.5	3	4	5	6	8	10
$v/(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	2.298	1.529	1.144	0.913	0.760	0.567	0.452	0.375	0.278	0.221
$144^{-1}Pv/(\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m)$	2.298	2.294	2.288	2.283	2.280	2.268	2.260	2.250	2.224	2.210

外推 Pv 值至零压强, 得

$$RT \approx 144(869.6) - 125222 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$$

所以

$$R \approx \frac{125222 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m}{1460^\circ\text{R}} = 85.769 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

与题 2.173 比较.

气体常数(混合气体)

2.182 写出混合气体常数的表达式. (a) 用有效分子量 (M_{mix}) 表示; (b) 用各种成分质量 (m_i) 和比气体常数 R_i 表示; (c) 用各种成分的摩尔比率 (x_i) 和分子量 (M_i) 表示.

解 (a)

$$R_{\text{mix}} = R_u/M_{\text{mix}}$$

(b)

$$R_{\text{mix}} = \sum m_i R_i / \sum m_i$$

(c)

$$R_{\text{mix}} = R_u / \sum x_i M_i$$

注: $M_{\text{mix}} = \sum x_i M_i$.

2.183^D 10kg 氧和 20kg 氮的混合物的气体常数是多少? (a) 每公斤混合物; (b) 全部混合物.

解 (a) 用题 2.182(b), 令 $R_i \equiv R_u/M_i$;

$$R_{\text{mix}} = \frac{\sum m_i R_i}{\sum m_i} = \frac{10(8.314/32) + 20(8.314/28)}{10 + 20} = 0.2845 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

注意: 这类计算需用到各气体的分子量.

(b) 每 30kg 混合物,

$$R = (30 \text{ kg})(0.2845 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) = 8.355 \text{ kJ/K}$$

2.184^D 20lb_m 氧和 40lb_m 氮的混合物的气体常数是多少? (a) 每磅混合物; (b) 全部混合物.

解 (a) 用题 2.182(b), 令

$$R_i \equiv R_u/M_i = (1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot \text{mole} \cdot ^\circ\text{R})/M_i$$

$$R_{\text{mix}} = \frac{\sum m_i R_i}{\sum m_i} = \frac{20(1545/32) + 40(1545/28)}{20 + 40} = 52.88 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

(b) 每 60lb_m 混合物,

$$R = (60 \text{ lb}_m)(52.88 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) = 3173 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/^\circ\text{R}$$

2.185 给出混合物的有效分子量与混合物各成分的分子量之间的关系.

解 因为各成分的质量比率为

$$x_i = m_i / \sum m_i = (m_i/M_i) / \sum (m_i/M_i)$$

所以

$$M_{\text{mix}} = \sum x_i M_i = \frac{\sum m_i}{\sum (m_i / M_i)} \quad (1)$$

注意: M_{mix} 与 M_i 单位相同.

2.186 求 20lb_m 的氧和 40lb_m 的氮的混合物的有效分子量.

解 将有关各量代入题 2.186 式(1), 得

$$M_{\text{mix}} = \frac{20+40}{(20/32)+(40/28)} = 29.22 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole}$$

2.187^D 计算 10kg 氧和 20kg 氮组成的混合物中各种成分的摩尔比率.

解

$$n(\text{O}_2) = 10/32 = 0.3125, \quad n(\text{N}_2) = 20/28 = 0.7143$$

$$x(\text{O}_2) = \frac{0.3125}{0.3125+0.7143} = 0.3043, \quad x(\text{N}_2) = \frac{0.7143}{0.3125+0.7143} = 0.6957$$

2.188^D 计算 20lb_m 氧和 40lb_m 氮组成的混合物中各种成分的摩尔比率.

解 与题 2.187 同. (想一下, 为什么?)

2.189^D 用题 2.187 的结果计算该混合物的比气体常数.

解 由题 2.182(c),

$$R_{\text{mix}} = \frac{8.3143}{(0.3043)(32)+(0.6957)(28)} = 0.2846 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

与题 2.183 比较.

2.190^D 用题 2.188 的结果计算该混合物的比气体常数.

解 由题 2.182(c),

$$R_{\text{mix}} = \frac{1545}{0.3043(32)+(0.6957)(28)} = 52.88 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$$

与题 2.184 比较.

2.191^D 一气体混合物含有 3.15kgCO₂, 1.26kgH₂O(蒸汽)和 11.305kg 氮. (a)混合物的有效分子量是多少? (b)混合物的气体常数是多少(kJ/kg · K)?

解 (a)由题 2.185 式(1), 有

$$M_{\text{mix}} = \frac{3.15+1.26+11.305}{(3.15/44.101)+(1.26/18.016)+(11.305/28.013)} = 28.831 \text{ kg/kmol}$$

$$(b) \quad R_{\text{mix}} = R_u / M_{\text{mix}} = (8.31451 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}) / (28.831 \text{ kg/kmol}) \\ = 0.28839 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

2.192^D 一气体混合物含有 3.15lb_mCO₂, 1.26lb_m H₂O 和 11.305lb_m N₂. (a)求混合物的有效分子量; (b)求其气体常数为多少(ft · lb_f/lb_m · °R)?

解 (a)由题 2.191(a), (想一下, 为什么?)

$$M_{\text{mix}} = 28.831 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole}$$

$$(b) \quad R_{\text{mix}} = R_u M_{\text{mix}} = (1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{lb}_m \text{ mole} \cdot ^\circ \text{R}) / (28.831 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole}) \\ = 53.59 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$$

2.193^D 一混合物含有 1kgH₂O(蒸汽), 4kgCO₂, 2kgO₂ 和 15kgN₂. (a)试对混合物进行体积比分析; (b)求混合物的有效分子量.

解 (a)在混合物中, 某种气体的体积比率等于其摩尔比率. 因此, 结果为表 2-1 所示. 表中 x_i 值由前一列对应的各行值除以前一列最后一行的值 n/m 得到.

(b)表 2-1 中 m_i 是归一化的, 所以, 可直接得到混合物的有效分子量

$$M_{\text{mix}} = m/n = 1/0.033812 = 29.575 \text{ kg/kmol}$$

表 2-1

<i>i</i>	成分	m_i/kg	质量比	M_i	质量比/ M_i	体积比, x_i
1	H ₂ O	1	1/22=0.0456	18.016	0.002523	0.0746
2	CO ₂	4	4/22=0.1818	44.010	0.004131	0.1222
3	O ₂	2	2/22=0.0909	31.999	0.002841	0.0840
4	N ₂	15	15/22=0.6812	28.013	0.024317	0.7192
		$m=22$			$n/m=0.033812$	1.0000

- 2.194^D 一混合物由 1lb_m H₂O(蒸汽), 4lb_m CO₂, 2lb_m O₂ 和 15lb_m N₂ 组成。(a)对混合物进行体积分析;(b)求混合物的有效分子量。

解 (a)与题 2.193(a)同。(想一下,为什么?)

(b) 29.575lb_m/lb_m mole.

- 2.195 根据 1976 年颁布的“美国标准大气”,在海平面以上 86km 的范围内,空气成分为(各成分的体积比率):氮,0.780840;氧,0.209476;氩,0.009340;二氧化碳;0.000314;氦,0.000018;氖,0.000005;及其他少量物质。试求空气的有效分子量及比气体常数。

解 在任一混合物中,体积比率即为摩尔比率,所以

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \sum x_i M_i = 0.780840(28.013) + 0.209476(31.999) + 0.009340(39.948) \\ &\quad + 0.000314(44.010) + 0.000018(20.179) + 0.000005(4.003) \\ &= 21.8737 + 6.7030 + 0.3731 + 0.0138 + 0.0004 + 0.0000 = 28.964 \text{ kg/kmol} \end{aligned}$$

由于有效分子量仅精确到小数点后第 3 位,所以结果有一定的不确定度。

$$R_{\max} = \frac{R_u}{M} = \frac{8.3145 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}}{28.964 \text{ kg/kmol}} = 0.28706 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

- 2.196 用 2.195 题的结果计算空气的比气体常数(用 USCS 制)。

解 有效分子量在任一单位制中数值相同,所以

$$R_{\max} = \frac{R_u}{M} = \frac{1545.33 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \text{ mol} \cdot ^\circ\text{R}}{28.964 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mol}} = 53.353 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

- 2.197 (a)将题 2.195 中的体积比率分析转换成质量比率分析;(b)用(a)的结果检验题 2.195。

解 (a)质量比率为

$$\mu_i = \frac{n_i}{\sum n_i} = \frac{n_i M_i}{\sum n_i M_i} = \frac{x_i M_i}{\sum x_i M_i} = \frac{x_i M_i}{M_{\max}}$$

由题 2.195, $M_{\max} = 28.964$; 因此,

$$\mu_{\text{N}_2} = 0.780840(28.013)/28.964 = 0.75520$$

$$\mu_{\text{CO}_2} = 0.209476(31.999)/28.964 = 0.23143$$

$$\mu_{\text{Ar}} = 0.009340(39.948)/28.964 = 0.01288$$

$$\mu_{\text{CO}_2} = 0.000314(44.010)/28.964 = 0.000013$$

$$\mu_{\text{He}} = 0.000005(4.003)/28.964 = 0.000001$$

(b)由题 2.182(b),

$$\begin{aligned} R_{\max} &= \sum \mu_i (R_u/M_i) = 0.75520(8.31451/28.013) + 0.23143(8.31451/31.999) \\ &\quad + 0.01288(8.31451/39.948) + 0.000477(8.31451/44.010) \\ &\quad + 0.000013(8.31451/20.179) + 0.000001(8.31451/4.003) \\ &= 0.28706 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

- 2.198^D 将空气视为四元混合物:氮 75.53%(重量比,同下);氧 23.14%;氩 1.28%;二氧化碳 0.05%。(a)计算混合物的有效分子量和气体常数(kJ/kg·K);(b)设混合物的总压强为 1bar,各种成分的分压是多少?

解 (a)与题 2.193 类似,作出 1kg 样品的体积分析;见表 2-2。

表 2-2

<i>i</i>	成分	M_i	质量比 m_i	m_i/M_i	体积比, x_i
1	N ₂	28.013	0.7553	0.02696	0.7810
2	O ₂	31.999	0.2314	0.00723	0.2094
3	Ar	39.948	0.0128	0.00032	0.0093
4	CO ₂	44.010	0.0005	0.00001	0.0003
			$m=1.0000$	$n=0.03452$	1.0000

因 $M_{\text{mix}} = m/n = 1.0000/0.03452 = 28.969 \text{ kg/kmol}$

由题 2.182(a) 有 $R_{\text{mix}} = R_u/M_{\text{mix}} = 8.31451/28.969 = 0.28701 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

(b) 在混合物中, $P_i = x_i P = x_i (1 \text{ bar})$

因此表 2-2 中最后一栏给出了分压(bar)。

- 2.199^D 将空气视为四元混合物:氮, 75.53%(重量比,下同);氧, 23.14%;氩, 1.28%;二氧化碳, 0.05%。(a) 计算混合物的有效分子量和气体常数(Btu/lb_m · °R);(b) 若总压强为 14.70 psia, 各种成份的分压是多少(psia)?

解 由题 2.198 知,(想一下,为什么)

(a) $M_{\text{mix}} = 28.969 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole}$

$R_{\text{mix}} = 1.98590/28.969 = 0.06855 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$

(b) $P_i = x_i (14.70 \text{ psia})$

蒸汽表的使用

在题 2.200~2.250 中,逐项填写表 2-3 中的空格,详解见后。

表 2-3

题号	T /K	P · bar	v /(m ³ /kg)	h /(kJ/kg)	s /(kJ/kg · K)	干度 x	态
2.200	350		0.001027				
2.201	350		3.846				
2.202	350		1.924				
2.203	350						
2.204	350		0.001021			0.75	
2.205	750	1					
2.206	750	100					
2.207	750			3434			
2.208	750			3420			
2.209				3440			
2.210					9.090		
2.211		1	0.001043				
2.212		1	1.694				
2.213		1	2.298				
2.214		1	4.614				
2.215		1	6.930				
2.216		1	1.000				
2.217		1	0.001020				
2.218		1		3028			

续表

题号	T /K	P /bar	v /(m ³ /kg)	h /(kJ/kg)	s /(kJ/kg·K)	干度 x	态
2.219		1		3600			
2.220		1		418			
2.221	425	5					
2.222	425	5		1000			
2.223	600	123.5			5.480		
2.224	600	200					
2.225	600	1250					
2.226	600	1					
2.227	600	0.1					
2.228		100		539.6			
2.229		100		3442			
2.230		100		3742			
2.231			0.595	3224			
2.232			0.495	3222			
2.233			0.545	3223			
2.234			100	3764			
2.235				2107	4.443		
2.236				2587	7.000		
2.237	315						0.50
2.238	310	0.1					
2.239	273.15			1000			0.40
2.240	250	1					
2.241	300	1					
2.242	350				5.000		
2.243		5		2775			
2.244		5			1.213		
2.245		5		4000			
2.246		5					
2.247		5	0.375				
2.248			0.400	3350	7.150		
2.249	725			3350			
2.250		30		3350			

2.200^D 解 由表 A2 可查得,350K 时的比体积的准确值为 0.001027m³/kg; 由表的脚注可知该值对应于饱和液体状态,因此,压强为 0.4163bar; 此凝聚态对应的熵值为 1.038kJ/kg·K; 质量比为 0.00; 态为饱和液体。

2.201^D 解 由表 A2 可查得比体积 3.846m³/kg 对应于蒸汽,因此压强为 0.4163bar; 蒸汽的焓值为 2639kJ/kg; 蒸汽的熵值为 1.657kJ/kg·K; x 值是 1.00; 饱和蒸汽态。

2.202^D 解 由表 A2 可查得,所给比体积值 1.924m³/kg 介于饱和液体的 0.001027m³/kg 与饱和蒸汽的 3.846m³/kg 之间,所以物理状态一定是气液混合物。解方程 $v_{\text{mix}} = (1-x)v_f + xv_g$, 得 $x = 0.5001$, 所以是质量比为 50% 的气液混合物; 焓为 $h_{\text{mix}} = (1-x)h_f + xh_g = 1480.4\text{kJ/kg}$; 熵为 $s_{\text{mix}} =$

$(1-x)s_f + xs_g = 4.348 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 压强仍为 0.4163 bar , 即给定温度下的饱和蒸汽压。

2. 203^D 解 由表 A2 知, 0.4163 bar , 350 K 时的饱和压强为 0.4163 bar . 比体积为 $(-x)v_f + xv_g = 2.886 \text{ m}^3/\text{kg}$; 比焓为 $(1-x)h_f + xh_g = 2060 \text{ kJ/kg}$; 比熵为 $(1-x)s_f + xs_g = 2.253 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.
2. 204^D 解 所给 350 K 时的比体积 ($0.001021 \text{ m}^3/\text{kg}$) 小于饱和液体的比体积 ($0.001027 \text{ m}^3/\text{kg}$) (见表 A2), 因此态为压缩液体; 本书中, 无 350 K 时压强大于 10 bar 的压缩液体的数据, 不过, 表 A5 中确有 360 K 时的数据, 可设比体积的减少量 $0.001021 - 0.001027 = -0.000006 \text{ m}^3/\text{kg}$ 出现在约 125 bar 的压强下 (360 K 时就是如此), 类似有: 360 K 时 $\Delta h = 373.4 - 363.8 = 9.6 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 所以 350 K 时焓约为 $321.8 + 9.6 = 331.4 \text{ kJ/kg}$; 而熵为 $1.037 + (1.147 - 1.156) = 1.28 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 质量比栏内应划一横线, 因为比质量的概念不适用于压缩液体或过热蒸汽。
2. 205^D 解 因为水的临界温度是 647 K , 所以 750 K 对应于单一态——过热蒸汽态; 由表 A5 可知, 750 K , 1 bar 时, $v = 4.359 \text{ m}^3/\text{kg}$; $h = 339 \text{ kJ/kg}$; $s = 8.770 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 对于过热蒸汽, 干度的概念不适用。
2. 206^D 解 与题 2. 205 一样, 由表 A5 知 $v = 0.0314 \text{ m}^3/\text{kg}$, $h = 3315 \text{ kJ/kg}$, $s = 6.521 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 干度一栏为空线。
2. 207^D 解 因为所给温度已超过临界温度, 所以从表 A5 的 750 K 这一行中可查得 $h = 3434 \text{ kJ/kg}$ 对应于 $P = 5 \text{ bar}$, 由题可查得 $v = 0.689 \text{ m}^3/\text{kg}$, $s = 8.023 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。
2. 208^D 解 查表 A5 发现 750 K 时没有 $h = 3420 \text{ kJ/kg}$ 的数据, 15 bar 时 $h = 3425 \text{ kJ/kg}$, 20 bar 时 $h = 3417 \text{ kJ/kg}$, 因此, 假设线性相关, $P = 15 + [(3420 - 3425)(3417 - 3423)]/5 = 17.5 \text{ bar}$; 类上, $v = 0.199 \text{ m}^3/\text{kg}$; $s = 7.435 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。
2. 209^D 解 查表 A5 发现 750 K 时没有 $h = 3440 \text{ kJ/kg}$ 的值, 1 bar 时 $h = 3439 \text{ kJ/kg}$, 1.5 bar 和 2 bar 时 $h = 3438$. 因此可判断压强小于 1 bar , 可能小于 0.5 bar . 因为比体积和比熵二者在压强趋于零时无限大, 最好对这些性质在表中打一问号。
2. 210^D 解 与题 2. 209 类似, v, s 栏中打问号. 不过, 可以用下列事实作一比较准确的估计: 温度不变时, $s_2 - s_1 = -R \ln \frac{P_2}{P_1}$ (见题 2. 325 式(2)). 蒸汽 $R = 0.46151 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (题 2. 172), 取 $P_1 = 1 \text{ bar}$, 则 $9.090 - 8.770 = -0.46151 \ln(P_2/1)$ 得 $P_2 \approx 0.50 \text{ bar}$, 此时, $v_2 = v_1(P_1/P_2) = 6.918 \text{ m}^3/\text{kg}$; $h \approx 3440 \text{ kJ/kg}$ 。
2. 211^D 解 给定的比体积很小(密度很大), 所以假设接近饱和液体状态. 查表 A4, 可知确为饱和液体, 因此, $h = h_f = 1417.5 \text{ kJ/kg}$; $s = s_f = 1.303 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 干度是 0; 态为饱和液体; 温度是 372.8 K 。
2. 212^D 解 与题 2. 211 一样, 表 A4 中 1 bar 时的 v_g 值与所给值相同, 因此是饱和蒸汽态, $x = 1.00$, $h = h_g = 2675 \text{ kJ/kg}$; $s = s_g = 7.360 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 温度也是 372.8 K 。
2. 213^D 解 在给定压强 (1 bar) 下, 所给的比体积值大于饱和蒸汽的表列数据, 所以状态是过热蒸汽; 在表 A5 中, $v = 2.298 \text{ m}^3/\text{kg}$ 对应于 500 K , 在此温度下 $h \approx 2929 \text{ kJ/kg}$; $s = 7.944 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。
2. 214^D 解 与题 2. 213 一样, 是过热蒸汽, 温度为 1000 K , $h = 3990 \text{ kJ/kg}$, $s = 9.402 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。
2. 215^D 解 表 A5 中没有列出蒸汽在 1 bar 时高于 $4.614 \text{ m}^3/\text{kg}$ (1000°K) 的比体积. 设蒸汽为理想气体, 在等压时, $v/T = \text{常数}$, 则由比例, $T \approx 1500 \text{ K}$; 也可外推 h 和 s 值, 不过需要知道比热和状态方程, 所以最好在 h 和 s 栏中打问号。
2. 216^D 解 表 A4 中, $1 \text{ m}^3/\text{kg}$ 的 v 值介于 $v_f = 1.043 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $v_g = 1.694 \text{ m}^3/\text{kg}$ 之间, 所以是气液混合态; $T = 372.8 \text{ K}$, 解方程得 $x \approx 59.0\%$; 因此, $h_{\text{mix}} = (1-x)h_f + xh_g = 1750 \text{ kJ/kg}$; $s_{\text{mix}} = (1-x)s_f + xs_g = 4.877 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 对 $0 < x < 1$, 372.8 K 是 1 bar 时的饱和温度。
2. 217^D 解 已知比体积很小, 表明可能处于液态. 1 bar 时饱和液体的比体积是 $0.001043 \text{ m}^3/\text{kg}$, 所以是压缩液体, 而这意味着压强实际高于 1 bar , 如果我们看一下表 A5 中 1 bar 时 $350, 360, 370 \text{ K}$ 时的 v 值, 可以发现, 最小值是 $1.027 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ (350 K 时), 温度每增加 10 K , $(\partial v / \partial T)_p \approx 0.007 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$; $s \approx 0.913 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 因为 340 K 时饱和蒸汽压是 0.2713 bar , 所以是压缩液体。

2. 218^D 解 若查表 A4 中 1bar 时的焓值 h_g , 会发现它比已知值小, 因此是过热蒸汽. 由表 A5 知, 1bar, 550K 时的 h 值正好相符, 所以, $v=2.531\text{m}^3/\text{kg}$, $s=8.134\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 219^D 解 焓值越大, 说明温度越高. 查表 A5 发现该 h 对应于 800K 之间, 内插得

$$T=800[(3600-3346)/(3654-3546)]50=825\text{K}$$

在此温度下

$$v=3.806\text{m}^3/\text{kg}$$

$$s=8.974\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$$

2. 220^D 解 1bar 时焓等于 $418\text{kJ}/\text{kg}$, 此值比饱和液体的焓值稍高, 若四舍五入, 正好相等. 取此值作为准确值, 则有 $418=h_{\text{mix}}=(1-x)(417.5)+x(2675)$, 解得 $x=0.0002\approx 0$, 很小, 可忽略; 所以是饱和液体态; $v=v_f=1043\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg}$, $s=s_f=1.303\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 221^D 解 5bar, 425K 的状态应由表 A5 中 420K 和 440K 的数据内插来求. 注意该表中比体积和其他性质有较大的跳跃. 而表 A4 给出了 5bar, 425K 时的值. 所以, 需要其他条件, 在 v, h, s, x 和态栏内均打问号.

2. 222^D 解 与题 2. 221 相比, 已知条件足以确定惟一的状态, 由表 A4, 建立方程 $h_{\text{mix}}=(1-x)h_f+xh_g$, 解得 $x=0.1708$, 所以,

$$v_{\text{mix}}=(1-x)v_f+xv_g=0.065\text{m}^3/\text{kg}$$

$$s_{\text{mix}}=(1-x)s_f+xs_g=2.708\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$$

2. 223^D 解 所给压强和温度值与表 A2 中所列相符, 所以, 已知条件不足以确定惟一的态, 不过, 所给的焓值能够确信是饱和蒸汽态, 故 $x=1$, $h=h_g=282\text{kJ}/\text{kg}$, $v=v_g=0.0137\text{m}^3/\text{kg}$.

2. 224^D 解 题 2. 223 中 $P=123.5\text{bar}$, $T=600\text{K}$ 对应于饱和和气液混合态(在此情况下, 适用于蒸汽态), 压强加大将成为压缩液体; 所以由表查得 $v=1.483\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg}$; $h=1489\text{kJ}/\text{kg}$; $s=3.469\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 225^D 解 此题与题 2. 223 和 2. 224 温度相同, 而压强进一步加大, 是高度压缩的液体, 表 A5 所列最高压强是 1000bar, 所以所求值只能由外推得到(预期精确度不高). 可能的值是 $v\approx 1.229\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg}$, $h\approx 1444\text{kJ}/\text{kg}$, $s\approx 3.177\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 226^D 解 由表 A5 直接查得 $v=2.763\text{m}^3/\text{kg}$; $h=3129\text{kJ}/\text{kg}$; $s=8.309\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 227^D 解 理想气体的焓仅与温度有关, 查表知, 焓与压强有关但关系不大. 0.1bar 时的焓约为 $3131\text{kJ}/\text{kg}$. 设体积遵循下列关系: $Pv=\text{常数}$, 所以, $v\approx 27.63\text{m}^3/\text{kg}$; 熵随压强变化, 理想气体也是如此. 由题 2. 235 中的(2)式(等温)和题 2. 172, $s(0.1\text{bar})-s(1\text{bar})=-0.46150\ln(0.1/1)=-1.0626\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$. 因此, $s(0.1\text{bar})=8.309-1.063=7.246\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 228^D 解 由表 A4 可查得, 在给定的压强下, 饱和液体的焓值是 $1408\text{kJ}/\text{kg}$, 比给出的 $539.6\text{kJ}/\text{kg}$ 高得多. 因此可排除气液混合态或过热态的可能性. 查表 A5 知, $T=400\text{K}$; 该温度下, $v=1.061\times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg}$, $s=1.592\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 229^D 解 100bar 时焓值等于 $3442\text{kJ}/\text{kg}$, 超过了 $2726\text{kJ}/\text{kg}$ 的 h_g 值, 所以一定是过热态. 由表 A5 查得, $T=800\text{K}$; $v=0.0343\text{m}^3/\text{kg}$; $s=6.685\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 230^D 解 由表 A5 知, 温度一定在 900K 与 950K 之间, 线性内插得 $900+[(3742-3688)/(3810-3688)](950-900)=922\text{K}$, 在此温度下, $v=0.0398+(22/50)(0.0424-0.0398)=0.0409\text{m}^3/\text{kg}$; $s=6.975+(22/50)(7.107-6.95)=7.033\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 231^D 解 此题要求的数据包括压强和温度. 确定比较困难. 下列性质可帮助求解: 理想气体的焓仅与温度有关, 与压强无关, 熵和体积与二者均有关; 液体的焓的绝对值及其随压强、温度的变化很小. 因此, 应由焓值来确定压强. 表 A2 中没有给出高于 $2801\text{kJ}/\text{kg}$ 的焓值, 所以假设在过热区. 1bar 时, $h=3224\text{kJ}/\text{kg}$ 对应的温度在 650K 与 700K 的区域, 发现与 $P=5\text{bar}$, $T=650\text{K}$ 相吻合. 此时 $s=7.722\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

2. 232^D 解 与题 2. 231 类似, $P=6\text{bar}$, $T=650\text{K}$, $s=7.636\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

- 2.233^D 解 查表 A5 知, $T=650\text{K}$, 压强介于 5bar 与 6bar 之间; 此时, $v=0.545\text{m}^3/\text{kg}$ 和 $h=3223\text{kJ}/\text{kg}$ 能同时出现. 设温度为 650K, 线性内插得, 给定的比体积在 $P=5+[(0.545-0.595)/(0.495-0.595)](6-5)=5.5\text{bar}$ 时出现, 而给定的焓也在 $P=5+[(3223-3224)/(3222-3224)](65-5)=5.5\text{bar}$ 时出现, 所以确为 5.5bar; 650K; 而 $s=7.699\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.
- 2.234^D 解 正如题 2.231 中所述, 体积变化通常比焓变大; 因此, 用焓求解较好. 由表 A5 知, 3764 kJ/kg 的焓值对应于 $T=900\text{K}$, $1<P<1.5\text{bar}$; $P=1\text{bar}$ 时, $v=4.152\text{m}^3/\text{kg}$; $P=1.5\text{bar}$ 时, $v=2.767\text{m}^3/\text{kg}$. 若要比体积 $v=10\text{m}^3/\text{kg}$, P 一定小于 1bar. 900K 时, $P=1\text{bar}$, 则 $Pv=4.152(1)=4.152\text{bar}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$; $P=1.5\text{bar}$, $Pv=2.767(1.5)=4.151\text{bar}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$. 由此可得出结论: 压强比 1bar 小, 才会得到 $Pv\approx 4.153\text{bar}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$. 因此, 比体积为 $10\text{m}^3/\text{kg}$ 时, $P=0.4153\approx 0.42\text{bar}$; 比熵可像题 2.227 一样求得 $s_2-s_1=0.4615/\ln(0.42/1)=-0.40036$, 而 $s_2=9.165-(-0.400)=0.565\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.
- 2.235^D 解 此题中已给出焓和熵值. 查表知, 这出现在临界点, $T=647.3\text{K}$, $P=221.2\text{bar}$, $v=0.003170\text{m}^3/\text{kg}$. 在临界点无干度的概念.
- 2.236^D 解 此题中也给出了焓和熵. 查表 A5, 分析几种可能性. 由表知, 当 $h=2586\text{kJ}/\text{kg}=h_g$ (320K) 时, $s_f=0.649$ 而 $s_g=8.151\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$. 饱和蒸汽态满足条件 $h\approx 2587\text{kJ}/\text{kg}$, 但 s_g 太大. 在 $h=h_g=2588\text{kJ}/\text{kg}$ (620K) 处, 饱和蒸汽态也满足 h 的已知条件, 而 s_g 仍太大. 重复这些尝试是必要的. 此题用 $h-s$ 图求近似解最方便, 由 $h-s$ 图知, $T\approx 380\text{K}$. 而 $h_{\text{mix}}=2587=(1-x)(448)+x(267)$, 解得 $x=0.9553$. 又 $s_{\text{mix}}=7.000=(1-x)(1.434)+x(7.223)$, 解得 $x=0.9615$. 两 x 值不一致, 所以应再尝试 $T<380\text{K}$. 若认可 $T=380\text{K}$ 时的值, 则 $v_{\text{mix}}=(1-0.9543)(0.001049)+0.9543(1.337)=1.276\text{m}^3/\text{kg}$; $P=1.287\text{bar}$.
- 2.237^D 解 因为温度和干度已知, 所以解此题很简单. 根据表 A2 线性内插, $P=\frac{1}{2}(0.06221+0.1053)=0.0838\text{bar}$; $v_{\text{mix}}=(0.5)(0.001009+18.46)=9.23\text{m}^3/\text{kg}$; $h_{\text{mix}}=(0.5)(15.2+2.57)=1376\text{kJ}/\text{kg}$; $s_{\text{mix}}=(0.5)(0.590+8.235)=4.418\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.
- 2.238^D 解 310K 时饱和蒸汽压是 0.0622bar. 已知压强超过了相同温度下的饱和压强, 所以是压缩液体. 而本书中的压缩液体表没有这么低的压强和温度值, 可近似采用饱和温度下的液体数据, 但不能采用饱和压强下的数据. 即采用 $v=v_f=0.001007\text{m}^3/\text{kg}$; $h=h_f=154.3\text{kJ}/\text{kg}$; $s=s_f=0.530\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$; 在质量比栏内画一空格线.
- 2.239^D 解 在给定的温度 273.15K 下, 由表 A2 知, 1000kJ/kg 的已知焓值介于饱和液体的焓值(0)和饱和蒸汽的焓值(2502)之间. 因此这是气液混合态; 解方程 $h_{\text{mix}}=1000=(1-x)(0)+x(2502)$ 给出 $x\approx 40\%$; 因此, $v_{\text{mix}}=(1-x)v_f+xv_g=82.5\text{m}^3/\text{kg}$; $s_{\text{mix}}=(1-x)s_f+xs_g=3.663\text{kJ}/\text{kg}$. 计算结果与已知条件相符. 假如考虑从固体到气体的转变, 则会导致不同的结果.
- 2.240^D 解 250K 时的饱和蒸汽压用线性内插求的话等于 0.00117bar (实际不是, 参见题 4.83~4.118). 这里不必求得其精确值; 已知压强超过了饱和压强, 一定是压缩固态, 其物理性质的改变基本与压强无关. 所求值为 $v=0.001087\text{m}^3/\text{kg}$; $h=380.3\text{kJ}/\text{kg}$; $s=-1.401\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.
- 2.241^D 解 300K 时的饱和蒸汽压是 0.035bar, 因为已知压强超过了饱和蒸汽压, 所以是压缩液态. 液体的性质对温度的依赖性远大于对压强的依赖性, 由表 A2 可得 $v=v_f=0.001003\text{m}^3/\text{kg}$; $h=h_f=112.5\text{kJ}/\text{kg}$; $s=s_f=0.393\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.
- 2.242^D 解 查表 A2 得 $s_f=1.038\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$, $s_g=7.657\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$; 解方程 $s_{\text{mix}}=(1-x)s_f+xs_g$, 得气液混合物的干度为 $x\approx 50\%$; 因此, $v_{\text{mix}}=(1-x)v_f+xv_g=2303\text{m}^3/\text{kg}$; $h_{\text{mix}}=(1-x)h_f+xh_g=1709\text{kJ}/\text{kg}$, 是两相混合态; 压强是 350K 时的饱和压强: 0.4163bar.
- 2.243^D 解 由表 A4 知, 压强等于 5bar 时, $h_f=640.3\text{kJ}/\text{kg}$, $h_g=2748\text{kJ}/\text{kg}$. 因为已知 h 比此压强下的 h_g 大, 一定是过热态. 由表 A5 知, 425K 时, $h=2748\text{kJ}/\text{kg}$; 440K 时, $h=2782\text{kJ}/\text{kg}$, 内插得 $T=425+[(2775-2748)/(2782-2748)](440-425)\approx 437\text{K}$; 类似地, 对 v 和 s 内插得 $v=0.375+(11.9/15)(0.391-0.375)=0.388\text{m}^3/\text{kg}$, $s=6.820+(11.9/15)(6.899-6.820)=6.883\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

kg · K.

- 2.244^D 解 由表 A4 知, 5bar 时, $s = 1.861 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 已知值 1.213 小于此 s 值, 所以一定是压缩液体; 查表 A2 知, 所求值介于 360K 与 370K 之间, 因此, 线性内插得

$$T = 360 + [(1.213 - 1.155) / (1.271 - 1.155)] \cdot (370 - 360) = 365 \text{ K}$$

在此温度下, 压强为 5bar 时的 $v = 1.038 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$; $h = 385.2 \text{ kJ/kg}$.

- 2.245^D 解 5bar 时, 表 A5 中所列焓的最大值是 3987 kJ/kg ($T = 100 \text{ K}$). 而已知焓值为 4000 kJ/kg , 意味着对应的温度略高于 1000K. 设焓随温度线性变化, 即比热为常数, 可求得 $T = 1000 + [(4000 - 3987) / (3987 - 3873)](50) = 1006 \text{ K}$; 此温度下,

$$v = 0.922 + (57/50)(0.922 - 0.875) = 0.927 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$s = 8.659 + (5.7/50) \times (8.659 - 8.541) = 8.672 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

- 2.246^D 解 由表 A4 可查得, 5bar 时, $v_g = 0.375 \text{ m}^3/\text{kg}$, 这与已知比体积值完全相同, 所以是饱和蒸汽态; 其他参数分别为 $T = 425.0 \text{ K}$; $h = h_g = 2748 \text{ kJ/kg}$; $s = s_g = 6820 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; x 的值是 1.00.

- 2.247^D 解 5bar 时, 表 A4 显示 $v_g = 0.375 \text{ m}^3/\text{kg}$, 低于已知值 $0.400 \text{ m}^3/\text{kg}$. 因此一定是过热态, 用表 A5 内插,

$$T = 440 + [(0.400 - 0.391) / (0.412 - 0.391)](460 - 440) \approx 449 \text{ K}$$

$$h = 2781.9 - (8.6/20)(2826.5 - 2781.9) = 2801.1 \text{ kJ/kg}$$

$$s = 6.899 + (8.6/20)(6.998 - 6.899) = 6.942 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

- 2.248^D 解 表 4 中饱和蒸汽的比焓的最大值为 2803 kJ/kg (30bar 时). 因为已知焓值大于此值, 所以一定处于过热状态, 而焓对压强的依赖性通常小于熵对压强的依赖性, 因此可判断温度介于 700K 与 750K 之间. 表 A5 的值是

	700K	750K
30bar	$h = 3293$	3405
	$s = 7.103$	7.167
40bar	$h = 3278$	3392
	$s = 6.864$	7.023

30bar 时, 3350 kJ/kg 的焓值对应于 $T = 700 + [(3350 - 3293) / (3405 - 3293)] \cdot (750 - 700) = 725.4 \text{ K}$; 在此温度下, $s = 7.013 + (25.4/50)(7.167 - 7.013) = 7.091 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 同理可得, 40bar 时, 3350 kJ/kg 的焓值对应的温度为 731.6 K ; 该温度下 $s = 6.964 \text{ kJ/kg}$. 压强介于 30bar 至 40bar 之间时, s 值不可能等于 $7.150 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 若选择 25bar 时 700K 和 750K 的数据内插得 $T = 722.5 \text{ K}$ 时, $h = 3350$; 此时, $s = 7.173 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 所求压强则为 $25 + [(7.150 - 7.173) / (7.091 - 7.173)](30 - 25) = 25.4 \text{ bar}$; 温度为 $722.5 + (1.4/5)(725.4 - 722.5) = 723.3 \text{ K}$; 内插得 26.4bar、723K 时的比体积为 $0.1124 \text{ m}^3/\text{kg}$.

- 2.249^D 解 在表 A5 中, 可明显看出, 1bar 时 3350 kJ/kg 焓值对应的温度低于 725K, 而 70bar 时该焓值对应的温度接近但略低于 750K; 25bar 时, $h = 3350 \text{ kJ/kg}$ 对应的温度为 $T = 700 + [(3350 - 3300) / (3411 - 3300)](750 - 700) = 722.5 \text{ K}$ (太低). 30bar 时, $h = 3350 \text{ kJ/kg}$ 对应的温度为 $T = 700 + [(3350 - 3293) / (3405 - 3293)](750 - 700) = 725.4 \text{ K}$ (太高). 因此, 实际压强为 $25 + [(725 - 722.5) / (725.4 - 722.5)](30 - 25) = 29.3 \text{ bar}$; 内插得 $v = 0.111 \text{ m}^3/\text{kg}$; $s = 7.103 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

- 2.250^D 解 由表 A5, 在前 700K 与 750K 之间内插, 得所求温度为 $T = 700 + [(3350 - 3293) / (3405 - 3293)](750 - 700) = 725.4 \text{ K}$; 此时, $v = 0.104 + (25.4/50)(0.112 - 0.104) = 0.108 \text{ m}^3/\text{kg}$; $s = 7.013 + 0.078 = 8.091 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

在题 2.251~2.299 中, 逐项填写表 2-4 中的空格, 详解如下.

表 2-4

题号	T °F	P psia	v (ft ³ /lb _m)	h (Btu/lb _m)	s (Btu/lb _m · °R)	干度, x	态
2.251	100		0.01513				
2.252	100		350				
2.253	100		175				
2.254	100					0.25	
2.255	100		0.0161				
2.256	800	10					
2.257	800	1000					
2.258	800			1412			
2.259	800			1375			
2.260	800			1435			
2.261	800				2.300		
2.262		500	0.0198				
2.263		500	0.928				
2.264		500	0.992				
2.265		500	1.700				
2.266		20	58.32				
2.267		20	7.50				
2.268			0.01505			0.00	
2.269		1		1150			
2.270		1		1459			
2.271		1		70			
2.272	300	67					
2.273	300	67		400			
2.274	600	1542			1.333		
2.275	600	2000					
2.276	600	3500					
2.277	600	1					
2.278	600	0.1					
2.279		1000		220.6			
2.280		1000		1448			
2.281		1000		1468			
2.282			7.444	1430			
2.283			8.560	1381			
2.284			6.194	1429			
2.285				904	1.059		
2.286				1118	1.700		
2.287	125					0.500	
2.288	40	1					
2.289	32			1000			
2.290	0	14.7					
2.291	50	14.7					
2.292	50				1.000		
2.293		500		1210			
2.294		500		194			
2.295		500		1550			
2.296		500			0.250		
2.297				1450	2.000		
2.298	850			1450			
2.299		225		1450			

2.251 解 查表 A1, 在“凝聚态”的比体积一列中有一值恰与已知值(0.01613 ft³/lb_m)相等, 由表注知此值对应的态是饱和液体; 而压强等于 0.9497 psia; 焓是 68.0 Btu/lb_m; 熵是 0.130 Btu/lb_m · °R; 干度是 0.00.

2. 252^D 解 查表 A1, 在比体积的蒸汽一行中可查得已知值 ($350 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$), 所以物理状态是饱和蒸汽, 其压强为 0.9497 psia ; 焓为 $1105 \text{ Btu}/\text{lb}_m$; 熵为 $1.982 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, x 值为 1.00 ; 饱和蒸汽态 (即饱和蒸汽).
2. 253^D 解 查表 A1, 已知的比体积值 ($175 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$) 介于饱和液体的值 ($0.00163 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$) 和饱和蒸汽的值 ($350 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$) 之间; 所以物理状态一定是气液混合态. 解方程 $v_{\text{mix}} = (1-x)v_f + xv_g$ 得 $x = 0.5000$. 所以是干度为 50% 的气液混合态; 焓是 $h_{\text{mix}} = (1-x)h_f + xh_g \approx 585 \text{ Btu}/\text{lb}_m$; 熵是 $s_{\text{mix}} = (1-x)s_f + xs_g = 1.056 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 压强仍为 0.9497 psia , 即为已知温度下的饱和蒸汽压.
2. 254^D 解 查表 A1, 压强 0.9497 psia (100°F) 下的饱和压强; 比体积是 $(1-x)v_f + xv_g = 87.5 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, 比焓是 $(1-x)h_f + xh_g = 327 \text{ Btu}/\text{lb}_m$; 比熵是 $(1-x)s_f + xs_g = 0.594 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.
2. 255^D 解 对于已知的温度 (100°F), 已知的比体积 ($0.016 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$) 小于饱和液体的比体积 ($0.01613 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$) (见表 A1), 因此物理状态是压缩液体. 顺着表 A3 的 100°F 的一列向下看, 可发现当压强介于 1 与 1500 psia 之间时比体积是 $0.0161 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ (精确到小数点后第 3 位). 取压强值约为 750 psia , 则 $h = (69.8 \pm 1.8) \text{ Btu}/\text{lb}_m$; $s = (0.129 \pm 0.001) \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$; $P = (750 \pm 750) \text{ psia}$; 干度栏画空线, 因为干度的概念不适用于压缩液体或过热液体.
2. 256^D 解 因为水的临界温度为 705°F , 所以 800°F 的温度只可能是过热态. 查表 A3, 可发现 800°F , 10 psia 时, $v = 74.98 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$; $h = 1433 \text{ Btu}/\text{lb}_m$; $s = 2.101 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 对于过热态, 干度的概念不适用.
2. 257^D 解 与题 2. 256 一样, 查表 A3 发现 $v = 0.688 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$; $h = 1390 \text{ Btu}/\text{lb}_m$; $s = 1.567 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; 干度一栏中画空线.
2. 258^D 解 因为温度已知且超过临界温度, 查表 A3 的 800°F 一列可发现, 当 $h = 1412 \text{ Btu}/\text{lb}_m$ 这一已知值时, $P = 500 \text{ psia}$; $v = 1.440 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$; $s = 1.658 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.
2. 259^D 解 表 A3 中 800°F 列没有 $h = 1375 \text{ Btu}/\text{lb}_m$ 的值, 只有 $1390 \text{ Btu}/\text{lb}_m$ 和 $1363 \text{ Btu}/\text{lb}_m$ 分别对应于 1000 psia 和 1500 psia , 线性内插, 得 $P = 1000 + [(1375 - 1390)/(1363 - 1390)]500 = 1278 \text{ psia}$, 类似可得, $v = 0.547 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $s = 1.534 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.
2. 260^D 解 表 A3 的 800°F 的一列中没有列出 $h = 1435 \text{ Btu}/\text{lb}_m$ 的值, 而 $h = 1434 \text{ Btu}/\text{lb}_m$ 位于表上 1 psia 和 5 psia 处, $1433 \text{ Btu}/\text{lb}_m$ 则对应于是 $0, 15, 20 \text{ psia}$. 所以已知的 h 值对应的压强小于 1 psia . 因为压强趋于零时比体积和比熵为无限大, 最好在表上的这些性质栏中打问号.
2. 261^D 解 与题 2. 260 情形相似. 在 v, s 栏中打问号. 其他各栏可根据下列事实进行比较精确的估算: 温度不变时, $s_2 - s_1 = -R \ln(P_2/P_1)$, [见题 2. 325 (2)] 对蒸汽, $R = 0.11023 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ (题 2. 173), 取 $P_1 = 1 \text{ psia}$, 则 $2.500 - 2.355 = -0.11023 \ln(P_2/1)$, 得 $P_2 \approx 0.268 \text{ psia}$; 在此情况下, $v_2 = v_1(P_1/P_2) = 2800 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$; $h_2 \approx 1435 \text{ Btu}/\text{lb}_m$.
2. 262^D 解 已知的比体积很小 (密度很大), 因此我们可以假设情形接近饱和液态. 查表 A3, 可发现表中饱和液体的比体积与已知值相同, 所以, $h = h_f \approx 450 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, $s = s_f = 0.649 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 干度是零, 态是饱和液体, 温度是 467.0°F .
2. 263^D 解 与题 2. 262 做法一样, 500 psia 时, 表 A3 显示蒸汽栏中有一 v 值与已知值相同, 所以是饱和蒸汽态; $x = 1.00$; 所以, $h = h_g = 1025 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, $s = s_g = 1.464 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 温度也是 467.0°F .
2. 264^D 解 在已知压强 500 psia 下, 已知的比体积值比饱和蒸汽的比体积值大, 这意味着是过热蒸汽态. 由表 A3 知, 500 psia 时, $0.992 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 的 v 值处于 500°F 处; 该点 $h = 1231 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; $s = 1.492 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.
2. 265^D 解 与题 2. 264 一样, 可发现状态是过热的, 温度为 1000°F ; $h = 152 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, $s = 1.737 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.
2. 266^D 解 表 A3 中蒸汽的比体积最大值为 $43.44 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ (在 $1000^\circ\text{F} = 1460^\circ\text{R}$ 时) 设蒸汽为理想气体, 那么, 压强不变时, $v/T = \text{常数}$; 因此, 由比例关系得, $T \approx 1960^\circ\text{R} = 1500^\circ\text{F}$. 可尝试外推 h 和 s 值, 但需用到比热或状态方程的数据, 在 h 和 s 栏内打问号.

2.267^D 解 在表 A3 中, $7.50\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 的值介于 $v_f = 0.0168\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 和 $v_g = 20.09\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 之间, 所以物理状态是 $T = 228.0^\circ\text{F}$ 的气液混合态. 解方程 $v_{\max} = (1-x)v_f + xv_g$, 得 $x \approx 37.3\%$, 因此, $h_{\max} = (1-x)h_f + xh_g = 554\text{Btu}/\text{lb}_m$; $s_{\max} = (1-x)s_f + xs_g = 0.857\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 时, 对 $0 < x < 1$ 的任意值, 温度是 20psia 时的饱和温度 228°F .

2.268^D 解 已知的比体积值很小隐含可能是液态, 1psia 时饱和液体的比体积为: 50°F 时, $0.0160\text{ft}^3/\text{lb}_m$, 100°F 时为 $0.0161\text{ft}^3/\text{lb}_m$, 所以 $T \approx 75^\circ\text{F}$, 紧接着知总压强为 1psia, 所以是过热液体. 看表 A1 下方的饱和液体 (因为 $x=0$), 可知温度一定在 60°F 至 80°F 之间, 假设线性内插有效, $T = 70^\circ\text{F}$, $P = 0.3817\text{psia}$, $h = h_f = 38.1\text{Btu}/\text{lb}_m$, $s = s_f = 0.075\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.269^D 解 查表 A3 中 1psia 时的焓值, 可知所求焓值比 1psia 时的 h_g 大, 因此是过热态, 再查表 A3 得, 200°F 时, h 值与已知值相同; 此时, $v = 392.5\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $s = 2.051\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.270^D 解 焓值比题 2.269 的大, 表明过热程度更加剧烈. 查表 A3 知已知 h 值介于 800°F 与 900°F 之间, 内插得 $T = 800 + [(1459 - 1434)/(1484 - 1434)] \cdot 100 = 850^\circ\text{F}$, 在此温度下 $v = 7801\text{ft}^3/\text{lb}_m$; $s = 2.374\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.271^D 解 1psia 的 $70\text{Btu}/\text{lb}_m$ 的焓值比饱和液体的焓值稍高, 若四舍五入, 正好相等. 若以此值为精确值, 则有 $70 = h_{\max} = (1-x)(69.7) + x(1106)$, 解得 $x = 0.0004 \approx 0$, 此值很小可近似不计, 所以态是饱和液态,

$$v = v_f = 0.0161\text{ft}^3/\text{lb}_m$$

$$s = s_f = 0.133\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

2.272^D 解 67psia , 300°F 的态需由表 A3 在 60psia 和 80psia 之间内插得到. 需要当心的是: 表中的比体积和其他性质跳跃较大. 表 A1 中恰好精确给出了 67psia , 300°F 同时出现, 因此需要知道更多的信息才能求解, 所以在 v, h, s, x 和态栏目中均打问号.

2.273^D 解 与题 2.272 对比可知, 有足够的信息可由表 A3 惟一确定态的情况, 令 $h_{\max} = (1-x)h_f + xh_g$, 解得 $x = 0.1429$; 所以 $v_{\max} = (1-x)(v_f + xv_g) = 0.094\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $s_{\max} = (1-x)s_f + xs_g = 0.608\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.274^D 解 已知的压强温度值与表 A1 所列值吻合, 所以仅由这些数据不足以惟一确定状态. 然而, 已知的焓值确能肯定状态是饱和蒸汽 ($x=1.00$), 因此, $v = v_g = 0.268\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $h = h_g = 1167\text{Btu}/\text{lb}_m$.

2.275^D 解 在题 2.274 中, 发现 76psia 的压强值对应于饱和的气液混合态 (不可能是蒸汽态). 压强加大则形成压缩液体, 由表值发现 $v = 0.0233\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $h = 614.5\text{Btu}/\text{lb}_m$, $s = 0.809\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.276^D 解 在相同的温度下, 压强比题 2.274 和 2.275 高, 说明是高度压缩的液体. 表 A3 的极限值是 300psia , 所以所求值需要外推求得 (预计精确性不高), 可能的值是 $v \approx 0.0226\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $h \approx 608.1\text{Btu}/\text{lb}_m$, $s \approx 0.797\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.277^D 解 直接从表 A3 查得: $v = 631.1\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $h = 1336\text{Btu}/\text{lb}_m$, $s = 2.271\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.278^D 解 理想气体的焓应当仅与温度有关, 而表值显示其与压强有关但关系不大. 0.1psia 时可能的焓值是 1336 和 $1337\text{Btu}/\text{lb}_m$, 假设体积满足 $P = \text{常数}$, 则 $v = 6311\text{ft}^3/\text{lb}_m$, 熵确实随压强变化很大, 即使是理想气体也是如此, 利用题 2.325 中的式 (2) (温度为常数) 和题 2.173, $s(0.1\text{psia}) - s(1\text{psia}) = -0.11020 \ln(0.1/1.0) = 0.254\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 因此, $s(0.1\text{psia}) = 2.271 + 0.254 = 2.525\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.279^D 解 在查 A3 中可查到已知压强, 饱和液体的焓值是 $542.5\text{Btu}/\text{lb}_m$, 比 $220.6\text{Btu}/\text{lb}_m$ 的已知值高得多. 因此, 可排除气液混合态或过热态的可能性. 查表 A3 知, 对 1000psia 的压强值, 对应的温度为 250°F , 在此温度下, $v = 1.0169\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $s = 0.366\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.280^D 解 1000psia 时, $1448\text{Btu}/\text{lb}_m$ 的焓值超过了 $542.5\text{Btu}/\text{lb}_m$ 的 h_g 值, 所以一定是过热态. 在表 A3 中, 已知焓值出现在 900°F 处, 此时, $v = 0.760\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $s = 1.612\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2.281^D 解 1000psia 时, 表 A3 显示温度一定介于 900°F 和 1000°F 之间, 用线性内插, 得温度为 $900 +$

$[(1468-1448)/(1506-1448)](1000-900)=934^{\circ}\text{F}$, 此时,

$$v=0.760+(34/100)(0.830-0.760)=0.784\text{ft}^3/\text{lb}_m$$

$$s=1.612+(34/100)(1.653-1.612)=1.626\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$$

- 2.282^D 解 此题已知的两数据既没有压强,也没有温度,确定这样的状态比较困难,可借助于下列事实.对理想气体,焓仅与温度有关,与压强无关,而熵和体积与两者有关.对于液态,焓大小及其随压强和温度的变化小得多.因此,应先设法确定的第一个简单的参数是焓,表 A1 没有高于 1206Btu/lb_m 的焓值,所以假设已知的焓值位于过热区,1psia 时, $h=1430\text{Btu}/\text{lb}_m$ 的值对应的温度在 700 和 800°F 之间.所以集中关注 $1 < P < 3000\text{psia}$, $700 \leq T \leq 800^{\circ}\text{F}$ 的区域,所求状态位于 100psia, 800°F 处,此时, $s=1.845\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$.

- 2.283^D 解 与题 2.282 类似,查表可知压强为 80psia;温度为 700°F, $s=1.829\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$.

- 2.284^D 解 查表 A3 知,所求状态可能出现在 800°F 压强在 100 至 150psia 的范围内,因为此时 $v=6.194\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 和 $h=1429\text{kJ}/\text{kg}$ 能同时出现.线性内插可求得,已知的比体积对应的压强 $P=100+[(6.194-7.444)/(4.943-7.444)](150-100) \approx 125\text{psia}$,两压强值相容,所以,如前所料,所求值为 125psia, 800°F, $s=1.822\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$.

- 2.285^D 解 此题中,焓和熵已知,查表可知是临界点, $T=705.4^{\circ}\text{F}$, $P=3206\text{psia}$, $v=0.051\text{ft}^3/\text{lb}_m$,干度的概念在临界点不适用.

- 2.286^D 解 此题中,焓和熵仍为已知,查表 A3,讨论几种可能性.对饱和蒸汽已知焓值出现约 130°F 处,但熵值太高,而高于 680°F 的饱和蒸汽也对应于此焓值,而熵值又太低,反复尝试求解是必要的,用莫利(Mollier)的 $h-s$ 图或 $T-s$ 图求近似解最为有用,由该图可得 $T \approx 215^{\circ}\text{F}$, $x \approx 0.95$;在 212°F 时尝试, $h_{\text{mix}}=1118=(1-x)(180.2)+x(1151)$,所以 $x=0.9670$,又由 $s_{\text{mix}}=1.700=(1-x)(0.312)+x(1.757)$,给出 $x=0.9606$;两结果相差 0.0064,查表 A3 中 228°F 时的 20psia 行, $h_{\text{mix}}=1118=(1-x)(196.3)+x(1156)$,得 $x=0.9604$; $s_{\text{mix}}=1.700=(1-x)0.336+x(1.732)$, $x=0.9771$,结果相差 0.0167,所以可猜测温度为 220°F,得到下列近似结果: $P \approx 17.2\text{psia}$, $v=(1-0.967)(0.0168)+0.967(23.15)=22.40\text{ft}^3/\text{lb}_m$.

- 2.287^D 解 因为温度和干度已知,解题很简单,用表 A1 线性内插,

$$P=1.694+[(125-120)/(140-120)](1.197)=1.993\text{psia}$$

$$v_{\text{mix}}=(0.5)(0.01622+183)=91.5\text{ft}^3/\text{lb}_m$$

$$h_{\text{mix}}=(0.5)(93.0+1116)=605\text{Btu}/\text{lb}_m$$

$$s_{\text{mix}}=(0.5)(0.174+1.923)=1.049\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$$

- 2.288^D 解 40°F 时,饱和蒸汽压强为 0.1216psia. 已知压强超过了相同温度下的饱和压强,所以是压缩液体.因为本书中没有如此低的压强和温度下的压缩液体表,可用饱和温度条件下的物质性质近似代替压缩液体的性质,而不能用饱和压强下的性质代替.换言之, $v=v_f=0.01602\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $h=h_f=8.0\text{Btu}/\text{lb}_m$, $s=s_f=0.016\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$ 干度栏中画空线.

- 2.289^D 解 32°F 的已知焓值可在表 A1 中查得介于饱和液体的焓(0)和饱和蒸汽的焓(1076Btu/lb_m)之间.因此,这是气液混合态;解方程 $h_{\text{mix}}=1000=(1-x)(0)+x(1076)$,得 $x=0.9294$. 所以 $v_{\text{mix}}=(1-x)v_f+xv_g=3069\text{ft}^3/\text{lb}_m$; $s_{\text{mix}}=(1-x)s_f+xs_g=2.033\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$,干度 92.9%与已知值非常接近,若考虑从固体到蒸汽的转变,结果将有所改变.

- 2.290^D 解 0°F 的饱和压强是 0.0185psia,已知压强为 14.7psia,超过 0.0185psia,因此是(压缩)固态,所求值为 $v=0.0174\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $h=-158.9\text{Btu}/\text{lb}_m$, $s=-0.325\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$.

- 2.291^D 解 50°F 时,饱和蒸汽压是 0.1780psia,因此已知压强超过饱和压强,所以物理状态是压缩液体.而液体性质对温度的依赖远大于对压强的依赖,由表 A1 知: $v=v_f=0.01602\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $h=h_f=18.1\text{Btu}/\text{lb}_m$, $s=s_f=0.036\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$.

- 2.292^D 解 由表 A1 可查得 $s_f=0.036$, $s_g=2.126\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R}$,因此,一定是气液混合态, $s_{\text{mix}}=1.000=(1-x)(0.036)+x(2.126)$,解得干度 $x=0.4612$,然后, $h_{\text{mix}}=(1-x)h_f+xh_g \approx 509\text{Btu}/\text{lb}_m$, $v_{\text{mix}}=(1-x)v_f+xv_g \approx 786\text{ft}^3/\text{lb}_m$.

2. 293^D 解 表 A3 给出 $h_f = 44.9 \text{ Btu/lb}_m$, $h_g = 1205 \text{ Btu/lb}_m$. 因为已知的 h 值比已知压强下的 h_g 值大, 所以一定是过热态. 由表 A3 知 467°F , $h_g = 1205 \text{ Btu/lb}_m$; 500°F , $h = 1231 \text{ Btu/lb}_m$. 内插得 $T = 467.0 + [(1210 - 1205)/(1231 - 1205)](500 - 467) \approx 470^\circ\text{F}$. 类似地, 内插 v 和 s , 得

$$v = 0.928 + (6.3/33)(0.992 - 0.828) = 0.940 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

$$s = 1.464 + (6.3/33)(1.492 - 1.464) = 1.469 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

2. 294^D 解 表 A3 显示, 500 psia 时, $h_f = 449.5 \text{ Btu/lb}_m$, 因为 h 的已知值小于此值, 所以物理状态一定是压缩液体. 查表 A1, 在 200 与 250°F 之间可找到所需的 h 值. 因此(线性内插)得 $T = 200 + [(194 - 169.2)/(219.6 - 169.2)](250 - 200) \approx 225^\circ\text{F}$. 在此温度和 500 psia 的压强下, $v = 0.0168 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $s = 0.329 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2. 295^D 解 在 500 psia 时, 表 A3 中列出的最大焓值是 1521 Btu/lb_m (1000°F), 已知值为 1550 Btu/lb_m 意味着温度一定稍高于 1000°F . 假设焓随着温度线性变化(即比热是常数), 则有 $T = 1000 + [(1550 - 1521)/(1521 - 1467)](50) = 1027^\circ\text{F}$, 在此情况下,

$$v = 1.700 + (26.9/50)(1.700 - 1.572) = 1.769 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

$$s = 1.737 + (26.9/50)(1.737 - 1.699) = 1.757 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

2. 296^D 解 表 A3 给出 $s_f = 0.649$, $s_g = 1.464 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 而 $0.250 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 的熵值小于 s_f 值, 所以物理状态是压缩液体. 在表 A3 中内插, 得 $T = 150 + [(0.250 - 0.215)/(0.293 - 0.215)](200 - 150) \approx 172^\circ\text{F}$. 此时, $v = 0.0163 + (22.4/50)(0.0003) = 0.0164 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $h = 119.1 + (22.4/50)(169.2 - 119.1) = 142 \text{ Btu/lb}_m$.

2. 297^D 解 查表 A3 知, 温度一定高于 800°F , 而压强介于 20 和 40 psia 之间, 局部值如下:

	800°F	900°F
20 psia	$h = 1433$ $s = 2.024$	1483 2.063
40 psia	$h = 1432$ $s = 1.948$	1483 1.986

在 20 psia , 1450 Btu/lb_m 的焓对应的温度为 $T = 800 + [(1450 - 1433)/(1483 - 1433)](900 - 800) = 834^\circ\text{F}$. 在 40 psia 时, 焓值出现在 $T = 800 + [(1450 - 1432)/(1483 - 1432)](900 - 800) = 835.3^\circ\text{F}$. 在 20 psia 和 834°F 时, $s = 2.024 + (14/100)(2.063 - 2.024) = 2.029 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; 在 40 psia 时和 835.3°F 时, $P = 20 + [(2.000 - 2.029)/(1.961 - 2.209)](40 - 20) = 28.5 \text{ psia}$, 温度因此是 $T = 834 + [(28.5 - 20)/(40 - 20)](835.3 - 834) \approx 835^\circ\text{F}$.

2. 298^D 解 1 psia 时, 由表 A3 知, 1450 Btu/lb_m 的焓值对应的温度低于 850°F . 1000 psia 时, 也是如此, 而 500 psia 时, 就不是这样. 尝试 250 psia : $h = 1450 = 1432 + (50/100)(1475 - 1432) = 1449 \text{ Btu/lb}_m$; 200 psia : $h = 1450 = 1420 + (50/100)(1477 - 1426) = 1452 \text{ Btu/lb}_m$, 所以 1450 Btu/lb_m 的焓值出现在 $P = 200 + [(1450 - 1452)/(1449 - 1452)](250 - 200) = 233 \text{ psia}$, v 和 s 的值可以内插得 $v = 3.488 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $s = 1.773 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

2. 299^D 解 利用表 A3, 在 800°F , 225 psia 时, 有 $h = 1424.5 \text{ Btu/lb}_m$, 在 900°F , 225 psia 时, 有 $h = 1476 \text{ Btu/lb}_m$. 因此, 焓值 1450 Btu/lb_m 出现在 $T = 800 + [(1450 - 1424.5)/(1476 - 1424.5)](900 - 800) \approx 850^\circ\text{F}$, 在此温度和 225 psia 时, $v = 3.457 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $s = 1.774 \text{ Btu/lb}_m$.

理想气体方程

2. 300 定义理想气体.

解 理想气体满足: (i) $Pv = RT$, (ii) c_p 或 c_v 是常数(对此气体, $c_p - c_v = R$).

2. 301 定义半理想气体.

解 半理想气体满足: (i) $Pv = RT$; (ii) c_p 或 c_v 仅是温度的函数(对此气体, $c_p - c_v = R$).

2. 302 (a) 解释什么是状态方程; (b) 给出理想气体状态方程的各种等价形式.

解 (a) 状态方程就是形如 $F(P, V, T) = 0$ 的函数关系, 通常写成一个变量是其他变量函数的形式, 如 $P = f(V, T)$.

(b) 基本形式是 $PV = nR_u T$ (n = 摩尔数); 这是通用形式, 没有涉及气体的具体参数, 引入参数 m (总质量) 和 M (摩尔质量) 并定义 $R = R_u / M$, 则可写出下列形式:

$$PV = mRT \quad Pv = RT \quad P = \rho RT$$

(在解题 2.300 和题 2.301 时, 任意选用了第二种形式)

2.303 写出理想气体的三个两变量的状态方程的名称.

解 玻意耳定律 (T = 常数); 查理定律 (P = 常数); 盖-吕萨克定律 (V = 常数).

2.304^D 一内体积为 0.05m^3 的车胎内空气温度为 25°C , 压强为 2bar , 在此状态下, 空气可视为理想气体, 求轮胎内空气的质量 (kg).

解 利用题 2.168, 知

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{(200\text{kN/m}^2)(0.05\text{m}^3)}{(0.28704\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(298\text{K})} = 0.177\text{kg}$$

2.305^D 一车胎内体积为 2ft^3 , 含有 80°F 的空气, 压强为 30psia , 在此状态下, 空气可视为理想气体, 求胎内空气的质量 (lb_m).

解 利用题 2.169, 得

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{(30 \times 144\text{lb}_f/\text{ft}^2)(2\text{ft}^3)}{(53.350\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})(540^\circ\text{R})} = 0.300\text{lb}_m$$

2.306 若将题 2.304 中的车泊在 -5°C 的环境中, 胎内空气的压强是多少?

解 需假设车胎在较冷的环境中体积没有改变, 根据盖-吕萨克定律, 得

$$P_2 = \frac{T_1}{T_2} P_1 = \frac{268\text{K}}{298\text{K}} (2\text{bar}) = 1.80\text{bar}$$

2.307^D 若将题 2.305 的车泊在 -10°C 的地方, 胎内空气的压强是多少? (a) psia; (b) psig.

解 (a) 需假设车胎在较冷的环境中体积没有改变, 根据盖-吕萨克定律, 得

$$P_2 = \frac{T_2}{T_1} P_1 = \frac{450^\circ\text{R}}{540^\circ\text{R}} (30\text{psia}) = 25\text{psia}$$

(b) 压强计读数是绝对压强与大气压强的差值. 题中未给出 -10°C 时的大气压强, 假设它为 14.7psia , 那么, $25 - 14.7 = 10.3\text{psig}$.

2.308^D 参见题 2.306. 要使压强达到 2bar , 需再泵入多少空气 (kg)? 假设泵入的空气温度也是 -5°C .

解 由 $PV = mRT$, 得

$$m_3 = (p_3/p_2)m_2 = (p_3/p_2)m_1 = (2/1.80)(0.117) = 0.130\text{kg}$$

因此需要泵入 $m_3 - m_2 = 0.013\text{kg}$ 的空气.

2.309^D 参见题 2.307. 要使压强达到 30psia , 需再泵入多少空气 (lb_m)? 假设泵入的空气温度也是 -10°C .

解 由 $PV = mRT$, 得

$$m = (P_3/P_2)m_2 = (P_3/P_2)m_1 = (30/25)(0.300) = 0.360\text{lb}_m$$

因此需要泵入 $m_3 - m_2 = 0.060\text{lb}_m$ 的空气.

2.310^D 计算温度为 300K , 压强为 16bar 的空气的比体积 (m^3/kg), 并将计算结果与真实空气表中的值 $0.8611\text{m}^3/\text{kg}$ 相比较.

解 利用题 2.168,

$$v = RT/P = (0.28704\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(300\text{K})/(1600\text{kN/m}^2) = 0.8610\text{m}^3/\text{kg}$$

这个真实空气表中的数值相差 $\frac{1}{8600}$.

2.311^D 计算温度为 80°F , 压强为 14.70psia 的空气的比体积 (ft^3/lb_m), 并将计算结果与题

2.162 中的计算值 $13.61(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$ 相比较.

解 利用题 2.169,

$$v = RT/P = (53.350 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})(54^\circ\text{R}) / (14.70 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2) = 13.60 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

这与题 2.62 的计算结果相差 $\frac{1}{1360}$.

2.312^D 计算 1bar, 300K 的 R12 的比体积 (m^3/kg), 并将结果与题 2.94 相比较.

解 由题 2.170,

$$v = RT/P = (0.06877 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(300\text{K}) / (100\text{kPa}) = 0.2063 \text{ m}^3/\text{kg}$$

比较精确的方法见题 4.23. 题 2.94 结果是 $0.2024 \text{ m}^3/\text{kg}$.

2.313^D 计算 R12 在 15psia, 40°F 时的比体积 (ft^3/lb_m) 并将结果与题 2.95 相比较.

解 利用题 2.171,

$$v = RT/P = (12.781 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})(500^\circ\text{R}) / (15 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2) = 2.958 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

比较精确的解法见题 4.24, 题 2.95 的结果是 $2.877 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$.

2.314 一房间体积为 100m^3 , 空气压强 1bar, 温度 300K, 房间内有一气球, 气球内空气温度也是 300K. 突然气球炸开, 气球内空气房间内压强上升到 1.3bar, 温度仍为 300K, 若气球的体积为 50m^3 , 计算 (a) 原来房间内 (气球外) 的空气质量; (b) 气球内空气的初始压强 (bar); (c) 房间的空气的总质量.

解 以 (a), (c), (b) 的顺序求解.

$$(a) \quad m = \frac{PV}{RT} = \frac{(100\text{kN/m}^2)(950\text{m}^3)}{(0.28704 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(300\text{K})} = 1103.4 \text{ kg}$$

$$(c) \quad m' = \frac{PV}{RT} = \frac{(130\text{kN/m}^2)(1000\text{m}^3)}{(0.28704 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(300\text{K})} = 1509.9 \text{ kg}$$

$$(b) \quad p = \frac{(m' - m)RT}{V} = \frac{(406.5 \text{ kg})(0.28704 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(300\text{K})}{50\text{m}^3} = 700 \text{ kN/m}^2 = 7\text{bar}$$

2.315 自行车胎内空气压强 14.7psia, 温度 80°F , 将其连到容量为 10in^3 的打气泵上. (a) 泵工作一个冲程后, 胎内压强达到 17.64psia, 若泵和车胎温度保持不变, 压强等于多少 (psia) 时胎的阀门一定打开? (b) 两个冲程后胎内压强为多少 (psia)?

解 (a) 这与题 2.314 相似, 区别只是, 由于有阀门, 体积可以假设不变.

$$m(\text{开始时胎内}) = \frac{(14.7 \text{ lb}_f/\text{in}^2)(100\text{in}^3)}{(53.350 \times 12 \text{ in} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})(540^\circ\text{R})}$$

$$m'(\text{打气后}) = \frac{17.64 \text{ psia}}{14.7 \text{ psia}} (0.00425 \text{ lb}_m) = 0.00510 \text{ lb}_m$$

$$P(\text{泵内}) = \frac{(0.00085 \text{ lb}_m)(53.350 \times 12 \text{ in} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})}{10\text{in}^3} = 29.4 \text{ psia}$$

(b) 每一冲程吸进 0.00085 lb_m , 而 $p \propto m$, 两冲程后,

$$P = \frac{0.00510 + 0.00085}{0.00510} (17.64) = 20.6 \text{ psia}$$

2.316 (a) 一容器内有 10kg 的一氧化碳 40°C 的体积为 3.0m^3 , 求气体的压强; (b) 慢慢加入一氧化碳, 使其压强上升至 10bar, 假设气体温度不变, 问加入的气体质量是多少?

$$\text{解} \quad (a) \quad P = \frac{mR_u T}{V} = \frac{(10/28.010)(8.31451)(313)}{3.0} = 310 \text{ kPa} = 3.1 \text{ bar}$$

(b) V, T 常数, $m \propto P$, 所以

$$m' = \frac{10 \text{ bar}}{3.1 \text{ bar}} (10 \text{ kg}) = 32.3 \text{ kg}, \quad \Delta m = 32.3 - 10 = 22.3 \text{ kg}$$

2.317 10ft^3 的罐内乙烷的压强为 50psia, 温度为 75°F , 计算气体的摩尔量 ($\text{lb}_m \text{ mole}$) 和质量 (lb_m).

$$\text{解} \quad n = \frac{PV}{R_u T} = \frac{(50 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2)(10\text{ft}^3)}{(1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \text{ mole} \cdot ^\circ\text{R})(535^\circ\text{R})} = 0.0871 \text{ lb}_m \text{ mole}$$

$$m = nM = (0.0871)(30.070) = 2.62 \text{ lb}_m$$

- 2.318 题 2.317 中气体部分流入另一体积为 5 ft^3 的真空容器内,两容器温度仍为 75°F ,求最后压强(psia).

解 由玻意耳定律,

$$P_1 V_1 = P_2 (V_1 + V_2) P_2 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} P_1 = \frac{10}{10+5} (50) = 33.33 \text{ psia}$$

- 2.319^D 在大气压下, 25°C 的氮气的密度是多少(kg/m^3)?

$$\text{解 } \rho = \frac{P}{RT} = \frac{101.325 \text{ kN/m}^2}{[(8.31451 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}) / (28.013 \text{ kg/kmol})] (298.15 \text{ K})} = 1.145 \text{ kg/m}^3$$

- 2.320 在大气压下, 77°F 的氮气的密度是多少(lb_m/ft^3)?

$$\text{解 } \rho = \frac{P}{RT} = \frac{2116 \text{ lb}_f/\text{ft}^2}{[(1545.33 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot \text{mol} \cdot ^\circ\text{R}) / (28.013 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \cdot \text{mole})] (536.69^\circ\text{R})} \\ = 0.0747 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

- 2.321 一圆柱形铝瓶内的空气为 10.33 bar , 300 K , 称重为 18 kg . 过一段时间, 用去部分空气后为 5.165 bar , 250 K , 重 12 kg , 试求: (a) 瓶的质量(kg); (b) 瓶的体积(m^3). (c) 用去的空气的质量(kg).

解 设圆柱质量为 m_0 ; 原来瓶内的空气质量为 m_1 , 后来质量为 m_2 , 由 $PV = mRT$. 体积不变时

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{P_2}{P_1} \frac{T_1}{T_2} = \frac{5.165}{10.33} \frac{300}{250} = 0.6, \text{ 又 } m_1 + m_0 = 18 \text{ kg}, m_2 + m_0 = 12 \text{ kg}, \text{ 解三个方程求 3 个未知数, 得}$$

$$(a) m_0 = 3 \text{ kg}, (b) V_1 = m_1 RT_1 / P_1 = 1.25 \text{ m}^3, (c) m_1 - m_2 = 6 \text{ kg}.$$

- 2.322 在研究气体行为的百列特(Burnett)方法中, 初始压强为 P_0 的气体体积从 V_0 膨胀进入体积为 V_1 的真空室, 温度为 T 不变, 膨胀使压强下降至 P_1 , 令 $N \equiv (V_0 + V_1) / V_0$, 气体状态方程是

$$PV = mRT + BP + CP^2 + \dots$$

试证明

$$\frac{P_0}{P_1} = N + (N-1) \left(\frac{B}{mRT} \right) P_0 + \left(N - \frac{P_1}{P_0} \right) \left(\frac{C}{mRT} \right) P_0^2 + \dots \quad (1)$$

解 初始时, 体积为 V_0 , $P_0 V_0 = mRT + BP_0 + CP_0^2 + \dots$, 然后, 随着气体膨胀, 有

$$P_1 (V_0 + V_1) = mRT + BP_1 + CP_1^2 + \dots$$

上面两式相除, 代入 N , 并交叉相乘, 得

$$NP_1 mRT + NP_1 BP_0 + NP_1 CP_0^2 + \dots = RTP_0 + BP_1 P_0 + CP_1^2 P_0 + \dots$$

再除以 $P_1 mRT$ 并移项, 即得式(1).

- 2.323 真空气体在百列特装置(见题 3.322)中膨胀, 压强从 75 bar 下降至 59.113 bar , 将体积 V_1 隔离并抽真空, 留在 V_0 中的气体然后再膨胀进入 V_1 , 压强从 59.113 bar 降至 46.738 bar , 进一步的膨胀使压强从 37.044 bar 降至 29.186 bar , 试根据状态方程 $PV = mRT + BP$, 求比率 B/mRT .

解 由题 2.322 中方程(1)得, 对第一次膨胀,

$$\frac{75}{59.113} = N + (N-1) \left(\frac{B}{mRT} \right) (75)$$

对于第二次膨胀,

$$\frac{59.113}{46.738} = N + (N-1) \frac{B}{mRT} (59.113)$$

同时求解 N 和 B/mRT , 得 $N = 1.24992$, $B/mRT = 1.005 \times 10^{-3} \text{ bar}^{-1}$.

注: 百列特(Burnett)方法仅仅以压强测量确定状态方程.

Tds 方程

- 2.324 导出普遍适用的 Tds 方程的二种形式.

解 从热力学第一定律(题 3.1)得,对于没有动能或势能改变的封闭系统, $dq - Pd v = du$. 假设一可逆过程, $dq = Tds$, 则

$$Tds = du + Pd v \quad (1)$$

在式(1)右边加減 vdP , 得

$$du + Pd v - vdP = vdP = d(u + Pv) - vdP = dh - vdP$$

即

$$Tds = dh - vdP \quad (2)$$

方程(1)、(2)即为所求.

2.325 对理想气体,求题 2.324 中式(1)、(2)的积分.

解 由题 2.300, $P/T = R/v$, $v/T = R/T$, 且比热均为常数, 因此, 式(1)、(2)除 T 得

$$ds = du/T + (R/v)dv = c_v(dT/T) + R(dv/v)$$

积分得

$$s_2 - s_1 = c_v \ln(T_2/T_1) + R \ln(v_2/v_1) \quad (1)$$

又 $ds = dh/T - (R/P)dP = c_p(dT/T) - R(dP/P)$, 积分得

$$s_2 - s_1 = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1) \quad (2)$$

2.326 如果对于气体, 有 $Tds = c_p dT - RTdP/P = c_v dT + RTdv/v$, $c_p - c_v = R$, 证明气体的状态方程一定是 $Pv = aT$, a 为一正常数.

解 将方程移项整理得

$$(c_p - c_v)dT = RT(dP/P + dv/v)$$

而 $c_p - c_v = R$, 所以

$$\frac{dT}{T} = \frac{dP}{P} + \frac{dv}{v}$$

积分得

$$\ln T = \ln P + \ln v - \ln a \quad \text{即 } Pv = aT$$

2.327 (a) 由题 2.325 导出理想气体的关系式

$$s_2 - s_1 = c_p \ln(v_2/v_1) + c_v \ln(P_2/P_1)$$

(b) 为什么此关系并不常用?

解 (a) 式(1)乘 c_p , 式(2)乘 c_v , 两式相减并除以 R 即得.

(b) 通常已知的是过程前后的压强和温度, 或体积和温度, 很少情况下同时已知压强和体积, 所以不常用.

2.328 证明理想气体的等熵过程方程为 $Pv^k = \text{常数}$, $k = c_p/c_v$.

解 在题 2.327 的方程中, 令 $s_1 = s_2$, 并除以 c_v , 得

$$0 = k \ln(v_2/v_1) + \ln(P_2/P_1) = \ln(P_2 v_2^k / (P_1 v_1^k))$$

所以 $P_2 v_2^k = P_1 v_1^k$, 即 $Pv^k = \text{常数}$.

2.329 用 P 和 T 表示题 2.328 中的方程.

解 由关系式 $Pv = RT$ 得 $\text{常数} = Pv^k = P(RT/P)^k = R^k (P^{1-k} T^k)$. 因此, $P^{1-k} T^k = \text{常数}$.

2.330 用 v 和 T 表示题 2.328 中的方程.

解 $\text{常数} = Pv^k = P(v(v^{k-1})) = RTv^{k-1}$, 因此, $Tv^{k-1} = \text{常数}$.

2.331 根据分子动理论, 下列情况的比热及 k 是多少? (i) 单原子气体, (ii) 双原子气体.

解 结果如下表所示(应记住这些数值):

	c_p/R	c_v/R	k
单原子	5/2	3/2	5/3
双原子	7/2	5/2	7/5

2.332 某氮气特性表显示在 0.1bar, 30K 和 1bar, 75K 两状态的熵相同, 前一状态的密度是 0.1604kg/m³; 后一状态的密度是 0.6407kg/m³, 这些数值与理想气体的等熵方程预期的结果是否相符?

解 对单原子理想气体($k=5/3$),题 2.329 中的方程可写为

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{5/2}$$

查 P - T 数据, $10 \stackrel{?}{=} (2.5)^{5/2}$, 或 $10 \stackrel{?}{=} 9.882$ (相差 1.18%).

题 2.330 的方程可重写为

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{3/2}$$

代入数据

$$\frac{0.6407}{0.1604} \stackrel{?}{=} (2.5)^{3/2} \quad \text{或} \quad 3.994 \stackrel{?}{=} 3.953 \text{ (相差 1.03\%)}$$

- 2.333** 氦气的一等熵过程数据如下: -280°F 时, 压强为 14.7 psia, -10°F 时, 为 150 psia, 140°F 时为 300 psia. 由理想气体理论预期 150 psia 和 300 psia 时的温度是多少?

解 由题 2.332 中的(1)式, 得 $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{2/5}$, 取 $T_1 = -280 + 460 = 180^\circ\text{R}$, $P_1 = 14.7$ psia, $P_2 = 150$ psia, 求得 $T_2 = T_1 (P_2/P_1)^{2/5} = 180 (150/14.7)^{0.4} = 456^\circ\text{R} = -4^\circ\text{F}$, 取 $P_1 = 300$ psia, 求得 $T_3 = (P_3/P_1)^{2/5} = 180 (300/14.7)^{0.4} = 601^\circ\text{R} = 141^\circ\text{F}$.

- 2.334** 氩气(单原子)的等熵压缩数据如下: (i) 10 bar 时, 300 K, (ii) 45 bar 时, 550 K, (iii) 200 bar 时, 1000 K, 根据理想气体理论, 在上述压强时温度为多少?

解 选用方程 $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{2/5}$, 从 10 到 45 bar, $(T_2/T_1) = (45/10)^{2/5} = 1.8251$, 而实际数据为 $T_2/T_1 = 550/300 = 1.8333$, 取 $T_1 = 300$ K, 则 $T_2 = 1.8251(300) = 547.5$ K; 误差为 $(2.5/550)_{100} = 0.45\%$, 从 10 到 200 bar, $(T_2/T_1) = (200/10)^{2/5} = 3.3145$, 因此, $T_2 = 3.3145(300) = 994.4$ K, 误差为 0.56%.

- 2.335** 氩气的等熵压缩数据如下: 80°F 时, 压强为 15 psia, 1300°F , 压强为 275 psia, 若氩气为理想气体, 1300°F 时压强为多大?

解 将题 2.332 中的(1)式写为 $P_2 = P_1 (T_2/T_1)^{5/2}$, 代入 $T_1 = 540^\circ\text{R}$, $T_2 = 1760^\circ\text{R}$, $P_1 = 15$ psia, 得 $P_2 = 15 (1760/540)^{2.5} = 287$ psia.

- 2.336** 炮筒中的氮气从 1000 bar, 5000 K 膨胀至 1 bar, 温度下降为 1030 K, 假设膨胀是等熵过程, 氮是理想气体, 膨胀后的温度是多少?

解 氮是双原子气体, 所以 T - P 关系(题 2.329)是 $T_2 = T_1 (P_2/P_1)^{2/7}$, 代入数据得 $T_2 = 695$ K, 误差很大是因为在这么大的温度范围内比热不是常数.

- 2.337** 氮从 1 bar, 280 K 等熵压缩至 1500 psia, 由理想气体理论, 压缩后的温度为多少? 并将结果与 1000 K 的实验值相比较.

解 由题 2.336 中的公式可得出 $T_2 = 1043.8$ K, 误差为 4.4%.

- 2.338** 14.5 psia, 40°F 的氮被等熵压缩至 1500 psia, 由理想气体理论预期的末态温度是多少($^\circ\text{F}$)? 并将结果与 1350°F 的实验值相比较.

解 由题 2.336 中的公式可得出 $T_2 = 1882^\circ\text{R}$, 与 1810°R 的实验值相差 3.8%.

- 2.339^D** 空气在 1 bar, 280 K 时被等熵压缩至 100 bar, 由理想气体理论预期的末态温度是多少? 将结果与 990 K 的实验值比较[并与题 2.337 比较].

解 空气是多种成分的混合物; 两种主要成份是氮和氧, 都是双原子分子, 因此若用关系式 $T_2 = T_1 (P_2/P_1)^{2/7}$, 将得到与题 2.337 相同的结果, 1043.8 K, 与实验值的误差较大——5.4%.

- 2.340^D** 14.7 psia, 45°F 的空气等熵压缩至 1470 psia. 由理想气体理论, 末态温度为多少($^\circ\text{F}$)? 并将结果与 1336°F 的实验值相比较.

解 由于空气成分的 99% 是双原子分子, 可用关系式 $T_2 = T_1 (P_2/P_1)^{2/7}$ 求解, 得 $T_2 = 1882^\circ\text{R} = 1422^\circ\text{F}$, 误差为 5%.

- 2.341^D** 1 bar, 280 K 的空气等熵压缩至 100 bar, 根据题 2.325 中的式(2), 末态温度是多少(K)? (a) 用 280 K 的比热计算; (b) 用平均比热计算; (c) 用平均温度下的比热计算.

解 (a) 令 $s_2 = s_1$, $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (表 B2), $T_1 = 280 \text{ K}$, $R = 0.2870 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (题 2.168), $P_1 = 1 \text{ bar}$, $P_2 = 100 \text{ bar}$, 解方程求 T_2 , 结果是 1043.2 K .

(b) 不知道末态温度就无法知道平均比热. 只能近似求解, 因为温度为 1043 K 时, $c_p \approx 1.148 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 所以平均比热是 $(1.148 + 1.005)/2 = 1.077 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 由此值 Tds 方程给出 $T_2 = 955.2 \text{ K}$.

(c) 近似的平均温度是 $(280 + 1043)/2 = 662 \text{ K}$, $c_p \approx 1.067 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 由此 c_p 值 Tds 方程给出 $T_2 = 966.3 \text{ K}$.

实验值是 998 K , 解(a)的误差是 5.4% ; (b)的误差是 3.5% ; (c)的误差是 2.4% .

- 2.342^D 15psia, 50°F 的空气等熵压缩至 1500psia, 由题 2.325 中的(2)式预期的末态温度是多少($^\circ\text{F}$)? (a)用 50°F 的比热计算; (b)用平均比热计算; (c)用平均温度下的比热计算.

解 (a) 令 $s_2 = s_1$, $c_p = 0.2402 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$ (表 B1), $T_1 = 510^\circ\text{R}$, $R = 0.06854 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$

(题 2.169), $P_2 = 1500 \text{ psia}$, $P_1 = 15 \text{ psia}$, 解方程求 $T_2 = 1989^\circ\text{R} = 1438^\circ\text{F}$.

(b) 不知道末态温度就无法确定平均比热, 作为近似, 设末态温度为 1900°R , 此时, $c_p = 0.275 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$, 所以平均比热是 $(0.240 + 0.275)/2 = 0.258 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$. 对于此值, Tds 方程给出 $T_2 = 1733^\circ\text{R} = 1273^\circ\text{F}$.

(c) 在近似的平均温度 $(510 + 1989)/2 \approx 1250^\circ\text{R}$ 下, $c_p = 0.255 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$. 对于此值, Tds 方程给出 $T_2 = 1738^\circ\text{R} = 1298^\circ\text{F}$.

实验值约为 1800°R , 解(a)误差 5.4% , (b)误差 3.7% , (c)误差 2.3% .

- 2.343^D 空气从 1bar, 280 K 压缩至 100bar, 从空气表求得的末态温度是多少(K) [与题 2.341 比较]?

解 利用题 2.90 中的(2)式, 选取第一种形式: $s_2^0 = s_1^0 + R \ln(P_2/P_1)$, 代入 $s_1^0 = 6.07 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (表 B2), $R = 0.28704 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (题 2.168), 又由已知压强得 $s_2^0 = 8.119 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 所以 $T_2 = 950 + \{(8.119 - 6.074)/(6.133 - 6.074)\}(50) = 988.1 \text{ K}$.

若取第二种形式(较好), $P_{r2} = P_{r1}(P_2/P_1)$, 代入 $P_{r1} = 1.926$ (表 B2), 由已知压强得 $P_{r2} = 192.6$, 所以 $T_2 = 950 + [(192.6 - 164.7)/(201.9 - 164.7)](50) = 987.5 \text{ K}$.

实验值是 990 K , 以上任一种尝试方法产生的误差均为约 0.2% .

- 2.344^D 15psia, 50°F (510°R) 的空气等熵压缩至 1500psia, 由空气表计算末态温度($^\circ\text{F}$) [与题 2.342 比较].

解 由题 2.90 式(2), 选第一种形式, $s_2^0 = s_1^0 + R \ln(P_2/P_1)$, 代入 $s_1^0 = 1.6264 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$ (表 B1), $R = 0.06856 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$ (题 2.169), 由已知压强得 $s_2^0 = 1.9420$, 所以 $T_2 = 1700 + [(1.942 - 1.927)/(1.943 - 1.927)](1800 - 1700) = 1794^\circ\text{R}$.

若选取第二种形式(较好), $P_{r2} = P_{r1}(P_2/P_1)$, 代入 $P_{r1} = 2.004$ (表 B1), 由已知压强得 $P_{r2} = 200.4$, 所以 $T_2 = 1700 + [(200.4 - 160.4)/(201.9 - 160.4)](1800 - 1700) = 1796^\circ\text{R}$.

实验值人为 1800°R , 上面任一种尝试方法产生的误差均为约 0.3% .

- 2.345 考虑半理想气体(题 2.301), 比热 $c_p = a_0 + a_1 T + a_2 T^2$, 证明: 对任意可逆的绝热过程, 有

$$P^{-R} T^{a_0} \exp(a_1 T + a_2 T^2/2) = \text{常数}$$

解 由题 2.90, 等熵变化服从下列定律: $s^0 - R \ln P = \text{常数}$, 或 $P^{-R} \exp s^0 = \text{常数}$, 这里

$$s^0 = \int c_p \frac{dT}{T} = \int (a_0 T^{-1} + a_1 + a_2 T) dT = a_0 \ln T + a_1 T + a_2 T^2/2$$

所以定律成为

$$P^{-R} \exp(a_0 \ln T + a_1 T + a_2 T^2/2) = P^{-R} T^{a_0} \exp(a_1 T + a_2 T^2/2) = \text{常数}$$

- 2.346 证明: 对于理想气体, 题 2.345 的结果简化成题 2.339 的结果.

解 理想气体: $a_0 = c_p$, $a_1 = a_2 = 0$, $R = c_p - c_v$, 所以题 2.345 给出

$$P^{-R} T^{c_p} = \text{常数}$$

将上式的指数除以 c_v , 得

$$P^{1-\frac{1}{k}} T^{\frac{1}{k}} = \text{常数}, \text{即 } P^{1-k} T^k = \text{常数}$$

这与题 2.329 结果一致。

综合题

- 2.347 (a) 定义温度区间 (T_1, T_2) 内的平均比热; (b) 若一种物质从温度 T_1 加热至 T_2 , 比热 c 是 T 的多项式函数。

$$c = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots$$

试导出 (i) 比热的平均值 \bar{c} , (ii) 平均比热 $(c_{T_1} + c_{T_2})/2 = c_{\text{avg}}$, (iii) 在平均温度下的比

$$\text{热 } c\left(\frac{1}{2}T_1 + \frac{1}{2}T_2\right) = c_T$$

解 (a) $c = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} c dT$

(b) (i) $\bar{c} = a_0 + a_1(T_1 + T_2)/2 + a_2(T_1^2 + 2T_1T_2 + T_2^2)/3 + \dots$

(ii) $c_{\text{avg}} = a_0 + a_1(T_1 + T_2)/2 + a_2(T_1^2 + T_2^2)/2 + \dots$

(iii) $c_T = a_0 + a_1(T_1 + T_2)/2 + a_2(T_1^2 + T_2^2)/4 + \dots$

注: 三种比热在线性近似下是一致的。

- 2.348 下表是蒸汽的等熵过程的数据:

P/bar	1	1.5	2	3	5	10
$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	2.298	1.685	1.343	0.987	0.664	0.387

若初始温度是 500K, 末态温度是多少(K)?

解 一种尝试方法是利用等熵方程 $0 = k \ln(T_2/T_1) - (k-1) \ln(P_2/P_1)$, [见题 2.325, $c_p/R = k(k-1)$], $k = [\ln(P_2/P_1)] / [\ln(v_1/v_2)]$ ($Pv^k = \text{常数}$ 的另一种形式, 见题 2.328) 将表中数据代入第 2 个方程, 得 $1 \rightarrow 1.5 \text{ bar}$, $k = 1.284$, k 的平均值是 1.293 (实际上, 这里已计算了 c_p 的平均值) $1 \rightarrow 10 \text{ bar}$, 运用第一个方程, 解得未知的末态为 $T_2 = 842.5 \text{ K}$ 。

在蒸汽表中插值: $800 + [(7.944 - 7.837) / (7.962 - 7.837)](50) = 842.8 \text{ K}$ 。这一解法, 表明缺少表列熵值时可用 $P-v$ 数值代替。

- 2.349 下列数据从蒸汽的等熵压缩过程中获得:

P/psia	15	30	45	60	75	100
$v/(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	37.98	22.35	16.09	13.01	10.86	8.72

若初始温度是 500°F (960°R), 末态温度是多少(°F)?

解 用等熵方程进行求解 $0 = k \ln(T_2/T_1) - (k-1) \ln(P_2/P_1)$ 。

见题 2.325, $c_p/R = k(k-1)$ 和 $k = [\ln(P_2/P_1)] / [\ln(v_1/v_2)]$ ($Pv^k = \text{常数}$ 的另一种形式; 见题 2.328)。将数据代入第二个方程, 求得: $50 \rightarrow 75 \text{ psia}$, $k = 1.307$; $30 \rightarrow 45 \text{ psia}$, $k = 1.234$; $45 \rightarrow 60 \text{ psia}$, $k = 1.354$; $50 \rightarrow 75 \text{ psia}$, $k = 1.235$; $75 \rightarrow 100 \text{ psia}$, $k = 1.311$, k 的平均值是 1.288 (实际上, 我们已经计算了平均 c_p)。再对 1 至 10 bar 用第一个方程, 求得未知的末态温度是 $T_2 = 1467^\circ\text{R} = 1007^\circ\text{F}$ 。

从蒸汽表求得的温度是 $1000 + [(1.924 - 1.920) / (1.920 - 1.884)](100) = 1011^\circ\text{F}$ 这一解法表明在缺少熵的数据时可用 $P-v$ 数据代替。

- 2.350 下列数据是 R12 从 1 bar 至 10 bar 等熵压缩过程中获得的:

P/bar	1	2	3	4	5	6	7	8	10
$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	0.1749	0.0938	0.0649	0.0498	0.0404	0.0341	0.0341	0.0260	0.0212

(a) 若初始温度是 262.2K, 末态温度可算得是多少? (b) 计算结果与 R12 表值比较如

何? (c) 计算结果的误差是怎么产生的?

解 (a) 与题 2.348 方法相同, 可求得 $1 \rightarrow 2 \text{ bar}, k = 1.113; 2 \rightarrow 3 \text{ bar}, k = 1.101; 3 \rightarrow 4 \text{ bar}, k = 1.086; 4 \rightarrow 5 \text{ bar}, k = 1.066; 5 \rightarrow 6 \text{ bar}, k = 1.076; 6 \rightarrow 8 \text{ bar}, k = 1.061; 8 \rightarrow 10 \text{ bar}, k = 1.093, k$ 的平均值是 1.085; 将此代入第一个方程得 $T_2 = 338.0 \text{ K}$.

(b) 从表求得的温度是 $340 + [(94.620 - 4.602) / (4.623 - 4.602)](10) = 348.6 \text{ K}$, 计算值低 10.6 K. 与题 2.348 比较, 误差较大.

(c) 计算公式是 $c_p/R = k/(k-1)$, 这公式对蒸汽比较适用, 而对像 R12 这样的复杂分子不够准确.

第三章 封闭系统的热力学第一定律和第二定律

热力学第一定律

3.1 阐述并解释热力学第一定律.

解 如果系统的质量不变,则系统能量的变化只能依靠热传递或做功,满足方程

$$Q + W = \Delta E$$

当 $Q = W = 0$ 时, E —恒量(能量守恒).

3.2 “为什么热力学第一定律可以写成:(a) $Q - W = \Delta E$; (b) $Q + W = \Delta U$.”

解 (a) 这里 W 是系统做的功.

(b) 在公式 $Q + W = \Delta E$ 中, E 是系统的总能量,它包括分子无规则运动所具有的内能(U)和规则、宏观的能量(如质心的动能和势能).在许多简单问题中这些规则的能量可以忽略, E 等于 U .

一个封闭系统进行各种变化.填写表 3-1 中的题 3.3~3.8.表下面有解答.

表 3-1

题号	${}_1Q_2$	W_2	U_1	U_2	ΔPE	ΔKE	ΔE
3.3	10	-5	5		0	0	
3.4	25	-10	5	5	-10		
3.5	-10	10		65	0	0	
3.6		?	10	7	+4	-4	
3.7	1	11	5	4	3		
3.8	5		15	5	10	0	

3.3 解 ${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$. 所以 $\Delta E = 10 - 5 = 5$. 因为 $\Delta KE = \Delta PE = 0$, 所以 $\Delta U = \Delta E = 5$. 又因为 $U_1 = 5$, 所以 $U_2 = U_1 + \Delta U = 5 + 5 = 10$.

3.4 解 ${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E = 25 - 10 = 15$. 因为 $\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$, 所以 $15 = U_2 - U_1 + \Delta KE + \Delta PE = 5 - 5 + \Delta KE - 10$, 所以 $\Delta KE = 25$.

3.5 解 ${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E = -10 + 10 = 0 = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = U_2 - U_1 + 0 + 0$, 所以 $U_1 = U_2 - \Delta E = 65 - 0 = 65$.

3.6 解 ${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E$ 得 ${}_1Q_2 + 7 = \Delta E$. 因 $\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = 7 - 10 - 4 + 4 = -3$, 所以 ${}_1Q_2 = -3 - 7 = -10$.

3.7 解 ${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E = 1 + 11 = 12$. 因 $\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$, 所以 $\Delta KE = \Delta E - \Delta U - \Delta PE = 12 - (4 - 5) - 3 = 10$.

3.8 解 ${}_1Q_2 + {}_1W_2 = \Delta E$, $5 + {}_1W_2 = \Delta E$. 又因 $\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = (5 - 15) + 0 + 10 = 0$, 所以 ${}_1W_2 = -5$.

3.9 (a) 定义循环; (b) 阐述一个循环过程的热力学第一定律.

解 (a) 一个系统经过一系列变化回到原来的状态.

(b) 用符号 \oint 表示对一个循环求积分. 因为 $E = U$ 是态函数, 经过一个循环 $\Delta E = 0$. 所以第一定律写成

$$\oint Q + \oint W = 0$$

(用 T - S 坐标系求 $\oint Q$ 的方法见 3.125~3.128 题.)

- 3.10 一个封闭系统从 $1 \rightarrow 2$ 的过程 W_{12} 和 Q_{12} 的值分别是 50kJ 和 -20kJ . 如果该系统回到状态 1, Q_{21} 为 $+10\text{kJ}$, 求功 W_{21} .

解 根据循环 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 的第一定律, $Q_{12} + W_{12} + Q_{21} + W_{21} = 0$, 所以

$$W_{21} = -Q_{12} - W_{12} - Q_{21} = -50 - (-20) - 10 = -40\text{kJ}$$

- 3.11 一封闭系统经过从 $1 \rightarrow 2$ 的过程 $Q_{12} = 20$, $W_{12} = -10$. 该系统经过另一种途径回到初始状态, $Q_{21} = -5$. 求返回过程所需的功 W_{21} .

解 根据循环 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 的第一定律, $Q_{12} + W_{12} + Q_{21} + W_{21} = 0$, 所以

$$W_{21} = -Q_{12} - W_{12} - Q_{21} = -20 - (-10) - (-5) = -5$$

- 3.12 一封闭系统从状态 1 变化到状态 2, $Q_{12} = 10$ 且 $W_{12} = -5$. 该系统经过另一路径 $2 \rightarrow 1$ 回到初始状态, Q_{21} 为 3. 求该循环中该系统总能量的变化.

解 为零.

- 3.13 一个闭合系统从状态 1 到状态 2, $Q = 0$ 且 $W = 100\text{J}$. 该系统经过第二个过程回到状态 1, $W = -80\text{J}$. 求第二个过程的热传递.

解 由循环 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 的第一定律, $Q_{12} + W_{12} + Q_{21} + W_{21} = 0$, $0 + 100 + Q_{21} - 80 = 0$, $Q_{21} = -20\text{J}$.

- 3.14 一个闭合系统经过 $1 \rightarrow 2$ 的过程 Q_{12} 和 W_{12} 的值分别为 -20Btu 和 $+35\text{Btu}$. 如果系统回到状态 1 需要的功 W_{21} 为 -25Btu , 求吸收的热量 Q_{21} .

解 因为整个过程 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 是一个循环, $Q_{12} + W_{12} + Q_{21} + W_{21} = 0$, 即 $-20 + 35 + Q_{21} - 25 = 0$, 所以 $Q_{21} = 10\text{Btu}$.

- 3.15 一闭合系统经过一循环 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$. 已知 $Q_{12} = 30$, $Q_{23} = 10$, $W_{12} = 5$, $W_{31} = 25$, $\Delta E_{31} = 15$, 求 Q_{31} , W_{23} , ΔE_{12} 和 ΔE_{23} .

解 该题可以通过一个表格来解决:

	Q	W	ΔE
$1 \rightarrow 2$	30	5	
$2 \rightarrow 3$	10		
$3 \rightarrow 1$		25	15

对过程 $1 \rightarrow 2$ 运用第一定律, $Q_{12} + W_{12} = \Delta E_{12} = 30 + 5 = 35$. 对过程 $3 \rightarrow 1$ 运用第一定律, $Q_{31} + W_{31} = \Delta E_{31}$, 解得 $Q_{31} = -10$. 因为所有过程构成一个循环, $\oint \Delta E = 0$. 已知 $\Delta E_{12} = 35$, $\Delta E_{31} = 15$, 由和为零得 $\Delta E_{23} + \Delta E_{12} + \Delta E_{31} = \Delta E_{23} + 35 + 15 = 0$, $\Delta E_{23} = -50$. 对于过程 $2 \rightarrow 3$, 已知 $Q_{23} = 10$, $\Delta E_{23} = -50$, 所以由第一定律得 $W_{23} = \Delta E_{23} - Q_{23} = -50 - 10 = -60$. 现在该表已经完成.

- 3.16 完成表 3-2 中的循环 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$.

解 对于过程 $1 \rightarrow 2$, $Q_{12} + W_{12} = \Delta E_{12}$, 得到 $12\text{kJ} = \Delta E_{12}$. 过程 $2 \rightarrow 3$ 中只有一项已知, 所以下面考虑过程 $3 \rightarrow 1$, 已知 $Q_{31} = 9\text{kJ}$, $W_{31} = -3\text{kJ}$, 所以 $\Delta E_{31} = Q_{31} + W_{31} = 9 - 3 = 6\text{kJ}$. 对于一个循环过程 $\oint \Delta E = 0$, 即 $\Delta E_{12} + \Delta E_{23} + \Delta E_{31} = 0$. 因为 $\Delta E_{12} = 12\text{kJ}$, $\Delta E_{31} = 6\text{kJ}$, 所以 $\Delta E_{23} = -\Delta E_{12} - \Delta E_{31} = -12 - 6 = -18\text{kJ}$. 现对过程 $2 \rightarrow 3$ 运用第一定律得到 $Q_{23} + W_{23} = \Delta E_{23}$, 即 $W_{23} = -10\text{kJ}$.

表 3-2

	Q/kJ	W/kJ	$\Delta E/\text{kJ}$
$1 \rightarrow 2$	27	-5	
$2 \rightarrow 3$	-8		
$3 \rightarrow 1$	9	-3	

- 3.17 完成表 3-3 中的循环 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1$.

表 3-3

	Q/Btu	$W/\text{ft} \cdot \text{lb}_f$	$\Delta E/\text{Btu}$
$1 \rightarrow 2$	-15	7782	
$2 \rightarrow 3$	10	7782	
$3 \rightarrow 1$	0		

解 首先进行转化得 $W_2 = W_3 = 10.00\text{Btu}$. 现对过程 $1 \rightarrow 2$ 运用第一定律, $Q_{12} + W_{12} = \Delta E_{12}$, 所以 $\Delta E_{12} = -5\text{Btu}$. 类似地, 对于过程 $2 \rightarrow 3$, $\Delta E_{23} = Q_{23} + W_{23} = 10 + 10 = 20\text{Btu}$. 由 $\Delta E_{12} + \Delta E_{23} + \Delta E_{31} = 0$, 得 $\Delta E_{31} = -15\text{Btu}$. 最后由 $Q_{31} + W_{31} = \Delta E_{31}$, 得到 $W_{31} = -15\text{Btu}$.

体积功

- 3.18 写出体积功(外界对 PVT 系统所做的机械功)的微分表达式.

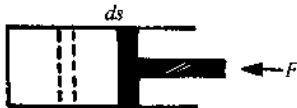


图 3-1

解 考虑一个内部装有可压缩液体的活塞——圆柱体仪器(图 3-1), 让活塞以恒定的速度压缩 ds 的距离; 所需力的大小为 $F = PdA$, 等于液体压力和活塞面积的乘积。所以对活塞所做的功为

$$dW = -Fds = -PA ds = -PdV$$

负号表示压缩($dV < 0$)对应系统做正功。

- 3.19 求(a)等温、(b)绝热、(c)多方过程中压缩气体做功的表达式。(d)在 P - V 坐标中画出它们的相对位置。

解 (a)

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} PdV = -mRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = mRT \ln \frac{V_1}{V_2}$$

(b) 由 2.328 题, $PV^k = \text{常数}$, 所以

$$\begin{aligned} W &= -\int_{V_1}^{V_2} PdV = -c \int_{V_1}^{V_2} V^{-k} dV = \frac{1}{k-1} \left[\frac{c}{V_1^{k-1}} - \frac{c}{V_2^{k-1}} \right] \\ &= \frac{1}{k-1} \left[\frac{P_2 V_2^k}{V_2^{k-1}} - \frac{P_1 V_1^k}{V_1^{k-1}} \right] = \frac{mR}{k-1} (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

(c) 对于多方过程 $PV^n = \text{常数}$, ($n \neq k$), W 的结果是将(b)中的 k 用 n 代替。

(d) 如图 3-2 所示。曲线(a)对应于等温过程 $PV = \text{常数}$; 曲线(b)对应于可逆的绝热线 $PV^k = \text{常数}$, 其中 $k > 1$; 曲线(c)对应于多方过程 $PV^n = \text{常数}$, 其中 $1 < n < k$ 。

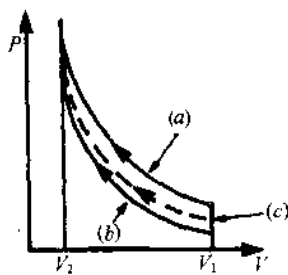


图 3-2

- 3.20 用压强比 P_2/P_1 表示题 3.19(a)中的结果。

解 根据理想气体公式,

$$\frac{P_1 V_1}{P_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2} = 1 \quad \text{即} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{P_2}{P_1}$$

所以, $W = mRT \ln(P_2/P_1)$ 。

- 3.21^D 1kg 的空气在 2bar 的压强和 300K 的温度下经过等温变化体积被压缩至原来的一半。求所需的功为多少 kJ。

解 由题 3.19(a),

$$W = (1\text{kg})(0.28704\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(300\text{K})(\ln 2) = 59.7\text{kJ}$$

- 3.22^D 2lb_m 的空气在 30psia 的压强和 80°F 的温度下经过等温压缩体积变为原来的一半。求所需的功为多少 ft · lb_f。

解 由题 3.19(a),

$$W = (2\text{lb}_m)(53.35\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})(540^\circ\text{R})(\ln 2) = 39940\text{ft} \cdot \text{lb}_f$$

- 3.23^D 一位学生解题 3.21 时假设压力随体积线性减少。则她的答案是多少?

解 用根据假设的线性关系得到的错误关系式 $\bar{P} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) = \frac{1}{2}(P_1 + 2P_1) = \frac{3}{2}P_1$ 代入正确的关系式 $W = -\bar{P}\Delta V$, 得到

$$W = -\frac{3}{2}P_1 \left(-\frac{1}{2}V_1\right) = \frac{3}{4}P_1 V_1 = \frac{3}{4}mRT = (0.75)(1\text{kg})(0.28704\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(300\text{K}) = 64.6\text{kJ}$$

- 3.24^D 一学生解题 3.22 时假设压力与体积成线性减少的关系。则答案是多少?

解 根据题 3.23 所说的理由, 得到

$$W = \frac{3}{4}mRT = (0.75)(2\text{lb}_m)(53.35\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})(540^\circ\text{R}) = 43222\text{ft} \cdot \text{lb}_f$$

- 3.25^D 如果周围的空气压强为 1bar, 重新求解 3.21 题。

解 体积的变化为 $|\Delta V| = V_1/2 = mRT/2P_1 = mRT/(4\text{bar})$, 所以空气做功为

$$\frac{1\text{bar}}{4\text{bar}}(mRT) = 21.5\text{kJ}$$

还需外界做功 $59.7 - 21.5 = 38.2\text{kJ}$ 。

- 3.26^D 如果周围的空气压强为 14.7psia, 重新求解 3.22 题。

解 用和 3.25 题相同的方法计算空气做的功:

$$\frac{14.7 \text{ psia}}{60 \text{ psia}} (mRT) = 14\,120 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$$

做的总功为 $39\,940 - 14\,120 = 25\,820 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$.

- 3.27^o 1kg 的空气在压强为 4bar 温度为 300K 的情况下体积等温膨胀到原来的两倍. 对外做功为多少 kJ?

解 对于相反的过程——1kg 的空气在 300K 的情况下体积压缩为原来的一半——需要外界做功 59.7kJ (由 3.21 题得). 所以当把体积膨胀为原来的两倍时需对外做功 59.7kJ. [由题 3.1 的转换, 也可说成外界做功 -59.7kJ.]

- 3.28^o 2lb_m 的空气在 30psia 80°F 的情况下体积等温膨胀为原来的两倍. 对外做功为多少 ft · lb_f?

解 39 940 ft · lb_f (见题 3.22 和 3.27).

- 3.29^o 一个活塞-气缸装置中有 1kg 空气在压强为 4bar 温度为 300K 的情况下体积等温膨胀为原来的两倍. 周围大气压强为 1bar. 对外做净功为多少 kJ?

解 由 3.21 题和 3.25 题知, 在相反的过程中大气做功 21.5kJ, 其他因素做功 38.2kJ. 所以在该过程中系统对空气做功 21.5kJ (“损失”功) 对其他做功 38.2kJ (“净”功或“有用”功).

- 3.30^o 2lb_m 的空气在活塞-气缸装置中在压强为 60psia 温度为 80°F 的情况下体积等温膨胀到原来的两倍. 此时周围大气的压强为 14.7psia. 对外做的净功为多少 ft · lb_f?

解 由题 3.22 和 3.26 知, 在相反的情况下, 大气做功 14 120 ft · lb_f, 其他因素做功 25 820 ft · lb_f. 所以在本题中, 系统对空气做功 14 120 ft · lb_f (“损失”功) 对其他做功 25 820 ft · lb_f (“净”功或“有用”功).

- 3.31 根据题 3.21 和 3.29 解释有效性的概念.

解 由 3.21 题可见, 一定质量的空气在活塞-气缸装置中等温膨胀时理想情况下做 59.7kJ 的功. 但考虑到大气的压强 (P_0), 实际(净)对外做功为 38.2kJ (3.29 题). 有效性为给外界的实际能量与理论预测能量的比.

这与从热机中获得能量有相似的推断. 我们可以用绝对温度作为某一过程热能的测量标准. 但在实际应用中把室温 (T_0) 作为有效的零势能点. 使得在室温下从热机获得的能量为零. “静态”表示与周围环境达到稳定平衡的状态. 任何材料, 当其压强为 P_0 温度为 T_0 时, 该材料任何物理态可利用的能量可视为零. P_0 为标准大气压 ($1.01\,325 \text{ bar} = 1 \text{ atm} = 14.696 \text{ psia}$) 温度 T_0 为 25°C (77°F, 537°R 或 298K).

- 3.32 一活塞-气缸装置中有 1kg 空气, 开始时 $v = 0.8 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T = 290\text{K}$. 气体被无摩擦缓慢压缩到 $v = 0.2 \text{ m}^3/\text{kg}$, 温度为 580K. 根据等式 $Pv^{1.5} = 0.75$ (P 的单位为 bar, v 的单位为 m^3/kg). 把这部分空气作为一个系统, 求: (a) 做的功; (b) 热传递 (以 kJ 为单位). 运用定值比热计算.

$$\begin{aligned} \text{解 (a)} \quad W &= -m \int_{v_1}^{v_2} P dv = -(1\text{kg}) \int_{0.8}^{0.2} (0.75) v^{-1.5} dv = 1.5 (1/\sqrt{0.2} - 1/\sqrt{0.8}) \\ &= 1.6772 \text{ bar} \cdot \text{m}^3 = 167.72 \text{ kJ}. \end{aligned}$$

$$\text{(b)} \quad \Delta U = mc_v \Delta T = (1\text{kg})(0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})[(580 - 290)\text{K}] = 208.2 \text{ kJ}$$

所以, $Q = \Delta U - W = 208.2 - 167.7 = 40.5 \text{ kJ}$. 这里 c_v 通过 $c_p - R$ 求得.

- 3.33 运用空气表重新求解题 3.32.

解 (a) 这部分没有变化: $W = 167.7 \text{ kJ}$.

(b) 通过修改 $u_2 = 397.2 + (30/50)(435.1 - 397.2) = 419.9 \text{ kJ/kg}$, $u_1 = (199.7 + 214.1)/2 = 206.9 \text{ (kJ/kg)}$. 所以 $\Delta U = m(u_2 - u_1) = 213.0 \text{ kJ}$, $Q = \Delta U - W = 213.0 - 167.7 = 45.3 \text{ kJ}$.

- 3.34 一个活塞-气缸容器装有 1kg 空气. 开始时 $v = 0.2 \text{ m}^3/\text{kg}$, 且 $T = 580\text{K}$. 气体经过一个缓慢的无摩擦过程, 体积膨胀到 $0.8 \text{ m}^3/\text{kg}$, 温度变为 290K. 该过程的方程为 $Pv^{1.5} = 0.75$ (P 的单位为 bar, v 的单位为 m^3/kg). 把空气作为系统, 求: (a) 做功, (b) 传递的热量 (均以 kJ 为单位). 运用定值比热计算.

解 该过程是 3.32 题的逆过程,且只包含可逆的功,所以,(a) -167.72kJ, (b) -40.5kJ.

3.35 运用空气表重新求解 3.34.

解 (a) -167.7kJ.

(b) $(-213.0) - (-167.7) = -45.3(\text{kJ})$.

3.36 气体被压缩在活塞-气缸装置中使得压强与体积的关系为 $P=a+bV$, 其中 a 和 b 为常数. 开始时气体状态为 5bar, 25cm^3 ; 末状态为 20bar, 5cm^3 . 所做的功为多少 kJ? 并判断是外界对系统做功还是系统对外界做功.

解 对系统做功为 $W = -P\Delta V$, 其中由于线性关系 $\bar{P} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2)$. 所以, $W = -\frac{1}{2}(25\text{bar})[(5-25)\text{cm}^3] = -250\text{bar} \cdot \text{cm}^3 = -250(100\text{kN/m}^2)(10^{-6}\text{m}^3) = 0.0250\text{kJ}$. 这是外界对系统做正功.

3.37 气体在活塞-气缸装置中膨胀使得压强与体积的关系为 $P=a+bV$, 其中 a 和 b 是常数. 开始气体状态为 20psia, 5in^3 . 最后状态为 5psia, 25in^3 . 所需做的功为多少 $\text{ft} \cdot \text{lb}_f$? 并判断是外界对系统做功还是系统对外界做功.

解 外界对系统做功为 $W = -P\Delta V$, 其中由线性关系 $\bar{P} = \frac{1}{2}(P_1 + P_2)$. 所以 $W = -\frac{1}{2}(25\text{lb}_f/\text{in}^2)[(25-5)\text{in}^3] = -250\text{lb}_f \cdot \text{in} = -20.83\text{ft} \cdot \text{lb}_f$. 系统对外界做正功.

3.38 3.3lb_m 的理想气体摩尔质量为 50, 现把它装在活塞-气缸装置中且开始时处在 15psia 40°F 的状态. 气体与外界发生热交换, 末状态为 540°F 和 60psia. 若该过程满足 $PV^2 = \text{常数}$, 该过程中所做的功为多少 $\text{ft} \cdot \text{lb}_f$?

解 把 $k=2$ 代入 3.19(b)题, 得

$$W = mR(T_2 - T_1) = (3.3\text{lb}_m)[(1545/50)\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}](500^\circ\text{R}) = 50990\text{ft} \cdot \text{lb}_f$$

3.39^D 装在活塞-气缸装置中的气体体积从 0.01m^3 增加到 0.03m^3 , 该过程满足 $P=aV^{-1}+b$, 其中 P 的单位为 bar, V 的单位为 m^3 . 如果 $a=0.060\text{bar} \cdot \text{m}^3$, 气体对活塞表面做功为 10.6kJ, 求 b .

$$\begin{aligned} \text{解 } W &= -\int_1^2 PdV = -\int_1^2 (aV^{-1} + b)dV = -a[\ln V]_1^2 - b[V]_1^2 \\ &= -a\ln(V_2/V_1) - b(V_2 - V_1) \end{aligned}$$

代入 $W = -0.106\text{bar} \cdot \text{m}^3$, $a = 0.060\text{bar} \cdot \text{m}^3$, $V_2/V_1 = 3.0$, $V_2 - V_1 = 0.02\text{m}^3$, 解得 $b = 2.00\text{bar}$.

3.40^D 装在活塞-气缸装置中的气体从 0.10ft^3 压缩至 0.05ft^3 , 该过程满足 $P=aV^{-2}+b$, 其中 P 单位为 atm, V 的单位为 ft^3 . 如果 $a=0.030\text{atm} \cdot \text{ft}^3$, 外界对气体做功为 424ft · lb_f, 求 b .

$$\begin{aligned} \text{解 } W &= -\int_1^2 PdV = -\int_1^2 (aV^{-2} + b)dV = -\left[\frac{1V^{-1}}{-1} + bV\right]_1^2 \\ &= (V_2 - V_1)\left[\frac{a}{V_1 V_2} + b\right]. \end{aligned}$$

代入 $W = (424\text{ft} \cdot \text{lb}_f)(2116\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{atm} \cdot \text{ft}^3) = 0.200\text{atm} \cdot \text{ft}^3$, $a = 0.030\text{atm} \cdot \text{ft}^3$, $V_1 V_2 = 0.005\text{ft}^6$, $V_1 - V_2 = 0.05\text{ft}^3$, 解得 $b = -2.0\text{atm}$.

3.41^D 装在一活塞-气缸装置中的气体体积从 0.8611m^3 被压缩到 0.17212m^3 . 压强(单位为 bar)与体积(单位为 m^3)的函数关系为

$$P = \frac{0.86110}{V} - \frac{8.60673 \times 10^{-5}}{V^2}$$

(a) 0.86110 的单位是什么? (b) 8.60673×10^{-5} 的单位是什么? (c) 所需的功为多少 kJ? (d) 如果考虑大气压(1bar)对活塞另一面做功, 所需的净功是多少 kJ?

解 要使该压缩方程大小正确, 每一项必须有相同的单位——bar. 所以, (a) $\text{bar} \cdot \text{m}^3$. (b) $\text{bar} \cdot \text{m}^6$.

$$(c) \quad W = -\int_1^2 PdV = -0.86110 \int_1^2 \frac{dV}{V} + (8.60673 \times 10^{-5}) \int_1^2 \frac{dV}{V^2}$$

$$\begin{aligned}
 &= -0.86110[\ln(0.17212/0.861)] - (8.60673 \times 10^{-5}) \left(\frac{1}{0.17212} - \frac{1}{0.861} \right) \\
 &= 1.386 \text{ bar} \cdot \text{m}^3 = 138.6 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

(d) 大气所做的功为 $-P\Delta V = (-1)(0.17212 - 0.861) = 0.689(\text{bar} \cdot \text{m}^3) = 68.9(\text{kJ})$. 净功等于压缩过程中对气体做的功(138.6 kJ)减去大气对活塞做的功(68.9 kJ), 即 69.7 kJ.

3.42^D 一活塞-气缸装置内装有 1.50 ft³ 的空气; 现气体膨胀到 30 ft³. 该过程满足方程

$$P = \frac{437.37}{V} - \frac{3.375}{V^2}$$

P 的单位为 lb_f/in², V 的单位为 ft³. (a) 该方程中 437.37 单位是什么? (b) 方程中 3.375 的单位是什么? (c) 在膨胀过程中气体做了多少功? (d) 如果考虑大气压(14.70 psia)作用在活塞的另一侧, 对外做的净功为多少 ft · lb_f?

解 要使膨胀方程大小正确, 每一项必须有相同的单位——lb_f/in². 所以

(a) lb_f · ft³/in².

(b) lb_f · ft⁶/in².

$$\begin{aligned}
 \text{(c)} \quad W &= - \int P dV = -437.37 \int_{1.50}^{30} \frac{dV}{V} + 3.375 \int_{1.50}^{30} \frac{dV}{V^2} \\
 &= -437.37 \left(\ln \frac{30}{1.5} \right) + 3.375 \left(\frac{-1}{30} + \frac{1}{1.50} \right) \\
 &= (-1308 \text{ lb}_f \cdot \text{ft}^3/\text{in}^2) (144 \text{ in}^2/\text{ft}^2) \\
 &= -188\,400 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f
 \end{aligned}$$

所以空气做功为 +188 400 ft · lb_f.

(d) 大气做功为 $-P\Delta V = -(14.70 \text{ lb}_f/\text{in}^2)(144 \text{ in}^2/\text{ft}^2)[(30 - 1.50) \text{ ft}^3] = -60\,300 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$. 净功等于气体膨胀过程中所做的功(188 400 ft · lb_f)减去活塞对大气做的功(位移功)(60 300 ft · lb_f), 即 128 100 ft · lb_f.

3.43^D 10 kg 的空气装在活塞-气缸装置中压强为 5 bar, 温度为 300 K, 等温膨胀到压强为 1 bar. (a) 做功为多少(kJ)? (b) 判断做功的方向(对内还是对外). (c) 空气内能的变化是多少(kJ)? (d) 热传递是多少(kJ)? 假设空气为理想气体.

$$\begin{aligned}
 \text{解} \quad \text{(a)} \quad W &= - \int_1^2 P dV = -[PV]_1^2 + \int_1^2 V dP = 0 + mRT \int_1^2 dP/P \\
 &= mRT \ln(P_2/P_1) = (10 \text{ kg})(0.28704 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(300 \text{ K})(-\ln 5) \\
 &= -1386 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

(b) 对外做功.

(c) 零(理想气体的内能仅与温度有关).

(d) 由热力学第一定律, $Q = \Delta U - W = 0 - (-1386) = 1386 \text{ kJ}$.

3.44^D 3.43 题中空气膨胀后, 固定活塞并加热使空气的压强回到原来的值(5 bar). (a) 做功为多少(kJ)? (b) 末温为多少(K)? (c) 空气内能的改变为多少(kJ)? (d) 热传递是多少(kJ)?

解 (a) 由于 $\Delta V = 0$, 所以 $W = \bar{P}\Delta V = 0$.

(b) 当理想气体体积不变时, $T_3/T_2 = P_3/P_2 = 5$, 即 $T_3 = 5T_2 = 5(300) = 1500 \text{ K}$.

(c) $\Delta U = m(u_3 - u_2)$. 根据表 B2, $u_3 = 1209 \text{ kJ/kg}$ 且 $u_2 = u_1$ (因为 $T_2 = T_1$) = 214 kJ/kg, $m = 10 \text{ kg}$. 所以 $\Delta U = 10(1209 - 214) = 9950 \text{ kJ}$.

(d) 由第一定律, $Q = \Delta U - W = 9950 - 0 = 9950 \text{ kJ}$.

3.45^D 5 lb_m 的空气装在活塞-气缸装置中, 且处在 14.7 psia, 40°F 的状态, 等温压缩到压强为 75 psia. (a) 做功为多少(ft · lb_f)? (b) 求做功的方向(对内还是对外). (c) 内能的变化是多少(Btu)? (d) 热传递是多少(Btu)? 假设为理想气体.

解 (a) 根据题 3.43(a),

$$W = mRT \ln(P_2/P_1) = (5 \text{ lb}_m)(53.35 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot {}^\circ\text{R})(500 {}^\circ\text{R})[\ln(75/14.7)] = 217\,300 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$$

(b) 外界对空气做功.

(c) 零(理想气体的内能仅是温度的函数)。

(d) 由热力学第一定律, $Q = \Delta U - W = 0 = (217.300 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f)(778.16 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = -279.2 \text{ Btu}$ 。

- 3.46 在 3.45 题压缩完成后, 给系统在恒定的压强下加热使体积回到原来的大小。(a) 做功为多少($\text{ft} \cdot \text{lb}_f$)? (b) 末温为多少($^{\circ}\text{F}$)? (c) 空气内能的变化为多少(Btu)? (d) 热传递为多少(Btu)?

$$\begin{aligned} \text{解} \quad (a) \quad W &= -P_2(V_1 - V_2) = P_2V_2 - P_2V_1 = P_1V_1 - P_2V_1 = (P_1 - P_2)(mRT_1/P_1) \\ &= (1 - P_2/P_1)mRT_1 = (1 - 75/14.7)(5 \text{ lb}_m)(53.35 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R})(500^{\circ}\text{R}) \\ &= -546.900 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f. \end{aligned}$$

(b) 对于理想气体,

$$\begin{aligned} T_3 &= T_2(V_3/V_2) = T_1(V_1/V_2) = T_1(P_2/P_1) \\ &= 500(75/14.7) = 2550^{\circ}\text{R} = 2090^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

(c) $\Delta U = m(u_3 - u_1)$, 由表 B1 中的数值,

$$\begin{aligned} u_1 &= (475.2 + 497.5)/2 = 486.4 \text{ Btu/lb}_m \\ u_2 &= u_1 - 85.2 \text{ Btu/lb}_m \quad m = 5 \text{ lb}_m \end{aligned}$$

所以

$$\Delta U = 5(486.4 - 85.2) = 2006 \text{ Btu}$$

(d) 由热力学第一定律,

$$Q = \Delta U - W = 2006 - (-546.900) = 279.2 \text{ Btu}$$

- 3.47 0.1 kg 空气在活塞-气缸装置中状态为 1 bar, 300 K。保持压强不变, 加热使体积膨胀为原来的两倍, 该过程中空气对外做功 10 kJ。(a) 末温为多少(K)? (b) 热传递为多少(kJ)? 把空气看成理想气体。

解 (a) 压强不变, $T \propto V$, 所以 $T_2 = 600 \text{ K}$ 。

(b) 根据表 B2 及热力学第一定律 $Q + W = \Delta U = m(u_{600} - u_{300}) = (0.1)(435.1 - 214.1) = 22.1 \text{ kJ}$ 。已知 $W = -10 \text{ kJ}$, 所以 $Q = 22.1 - (-10) = 32.1 \text{ kJ}$ 。

- 3.48 体积为 0.1 m^3 的气缸中装有氢气, 氢气的分子量为 2.016 且比热之比为 $k = 1.41$ 。开始时氢气的压强为 1 bar, 温度为 30°C , 通过绝热压缩使压强升至 20 bar。求: (a) 氢气的质量; (b) 氢气做的功。

$$\begin{aligned} \text{解} \quad (a) \quad m &= MPV/R_u T = (2.016 \text{ kg/kmole})(100 \text{ kN/m}^2)(0.1 \text{ m}^3)/(8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K})(303 \text{ K}) \\ &= 0.0080 \text{ kg (即 } 8 \text{ g)} \end{aligned}$$

(b) 由题 3.19(b), 运用绝热过程方程 $(V_2/V_1)^k = P_1/P_2$, 得到对氢气做的功为

$$W = \frac{1}{k-1}(P_2V_2 - P_1V_1) = \frac{P_1V_1}{k-1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right]$$

代入 $P_1 = 100 \text{ kN/m}^2$, $V_1 = 0.1 \text{ m}^3$, $k = 1.41$ 和 $P_2/P_1 = 20$, 得到 $W = 33.90 \text{ kJ}$; 氢气做的功为 -33.90 kJ 。

- 3.49 活塞-气缸装置中装有 0.2 kg 的致冷剂 R12, 开始的压强为 8 bar, 温度为 330 K。等压冷却该液体使体积减为原来的 45.8%。(a) 需做多少(kJ)的功? (b) 热传递为多少(kJ)?

解 由表 C6 知开始时处于过热态, $v_1 = 0.0250 \text{ m}^3/\text{kg}$, $h_1 = 583.0 \text{ kJ/kg}$ 。等压冷却后 $P_2 = P_1 = 8 \text{ bar}$, $v_2 = 0.458v_1 = 0.01145 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。由表 C4 得压强为 8 bar 时 $v_f < v_2 < v_g$, 使得末态为气液混合物。解 $v_{\text{mix}} = 0.01145 = (1-x_2)(7.804 \times 10^{-4}) + x_2(0.0221)$ 得 $x_2 = 0.50$ 。

$$(a) \quad W = -Pm(v_2 - v_1) = -(800 \text{ kN/m}^2)(0.2 \text{ kg})(-0.0125 \text{ m}^3/\text{kg}) = 2.00 \text{ kJ}$$

(b) 由热力学第一定律, $Q = \Delta U - W = m\Delta u - W$ 。初态 $u_1 = h_1 - P_1v_1 = 583.0 - (800)(0.0250) = 563.0 \text{ kJ/kg}$ 。末态 $u_2 = (1-x_2)u_f + x_2u_g = (u_f - u_g)/2$, 其中 $u_f = h_f - Pv_f = 431.8 - (800)(7.804 \times 10^{-4}) = 431.2 \text{ kJ/kg}$, 且 $u_g = h_g - Pv_g = 565.7 - (800)(0.0221) = 548.0 \text{ kJ}$ 。所以 $u_2 = 489.6 \text{ kJ/kg}$, $Q = m\Delta u - W = (0.2)(489.6 - 563.0) - 2.00 = -16.68 \text{ kJ}$ 。

解 另一种方法, 对于该封闭系统的等压过程, $Q = \Delta H$ (见 3.144 题)。末态 $h_2 = (1-x_2)h_f + x_2h_g = (h_f - h_g)/2 = 498.8 \text{ kJ/kg}$; 初态焓为 583.0 kJ/kg 。所以 $Q = \Delta H = m\Delta h = (0.2)(498.8 - 583.0) = -16.84 \text{ kJ}$ 。该结果与用内能求得的结果只差百分之一。

- 3.50² 致冷剂 R12 被装在密封的容器中, 开始时压强为 2 bar, 含量为 50%; 容器的容积为

0.10m³. 加热使压强增至 5bar. (a)求系统的质量(kg); (b)增加的热量是多少(kJ)?

解 (a)根据表 C4, $v_{\text{mix}} = (1-x)v_f + xv_g = (1-0.50)(6.970 \times 10^{-4}) + (0.50)(0.0840) = 0.0423 \text{ m}^3/\text{kg}$. 所以 $m = V/v_{\text{mix}} = 0.10/0.0423 = 2.364 \text{ kg}$.

(b)由第一定律, $W=0$ (密闭容器), $Q = \Delta U = m(u_2 - u_1)$. 开始时 ($P_1 = 200 \text{ kPa}$), $u_1 = h_1 - P_1 v_f = 388.2 - (200)(6.970 \times 10^{-4}) = 388.1 \text{ kJ/kg}$, $u_g = h_g - P_1 v_g = 546.4 - (200)(0.0840) = 529.6 \text{ kJ/kg}$. 所以 $u_1 = (1-x)v_f + xv_g = 458.9 \text{ kJ/kg}$. 在末态条件下, $P_2 = 500 \text{ kPa}$, $v_2 = v_1 = 0.0423 \text{ m}^3/\text{kg}$. 表 C6 说明末态处于过热状态, $T_2 = 320 + [(0.0423 - 0.0422)/(0.0438 - 0.0422)]10 = 320.6 \text{ K}$. 在该温度下 $h_2 = 586.8 + (0.6/10)(593.3 - 586.8) = 587.2 \text{ kJ/kg}$, 所以 $u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 587.2 - (500)(0.0423) = 566.1 \text{ kJ/kg}$. 所以 $Q = m(u_2 - u_1) = (2.364)(566.1 - 458.9) = 253.4 \text{ kJ}$.

3.51^D 制冷剂 R12 被装在密封的容器中, 开始时压强为 30psia, 含量为 50%; 容器的体积为 5ft³. 加热使温度升至 100°F. (a)系统的质量为多少(lbm)? (b)加热的量为多少(Btu)?

解 (a)由表 C3, $v_{\text{mix}} = (1-x)v_f + xv_g = (1-0.50)(0.01118) + (0.50)(1.321) = 0.667 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 所以, $m = V/v_{\text{mix}} = 5/0.667 = 7.496 \text{ lb}_m$.

(b)由第一定律且 $W=0$ (密封容器), $Q = \Delta U = m(u_2 - u_1)$. 在初始条件 ($P_1 = 4320 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$), $u_f = h_f - P_1 v_f = 10.71 - (4320)(0.01118)/778 = 10.65 \text{ Btu/lb}_m$ 且 $u_g = h_g - P_1 v_g = 78.35 - (4320)(1.321)/778 = 71.01 \text{ Btu/lb}_m$. (除以 778 是把 $\text{ft} \cdot \text{lb}_f$ 转化为 Btu.) 在末态, $T_2 = 100^\circ\text{F}$, $v_2 = v_1 = 0.667 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 表 C5 说明末态为过热态, $P_2 = 60 + [(0.667 - 0.766)/(0.557 - 0.766)](80 - 60) = 69.5 \text{ psia} = 10000 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$; 在该压强下 $h_2 = 90.53 + (9.5/20)(89.64 - 90.53) = 90.11 \text{ Btu/lb}_m$. 所以, $u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 90.11 - (10000)(0.667)/778 = 81.53 \text{ Btu/lb}_m$, $Q = m(u_2 - u_1) = (7.496)(81.53 - 40.84) = 305.0 \text{ Btu}$.

3.52 一个密封绝热的容器被一块挡板分成两部分. 一部分体积为 2m³, 压强为 5bar, 温度为 300K; 另一部分体积为 5m³, 被抽成真空. 现抽去挡板则空气充满整个容器. 把空气看成热力学系统, (a)做了多少(kJ)的功? (b)热传递为多少(kJ)? (c)内能的变化为多少(kJ)? (d)求该过程最终温度为多少(K)? (e)最终压强为多少(bar)? 把空气看成是理想气体.

解 (a)在该膨胀过程中外力不做功, $W=0$.

(b)因为系统绝热, $Q=0$.

(c)因为 $W=0$ 和 $Q=0$, 则 $\Delta U=0$.

(d) $0 = \Delta U = m\bar{c}_v \Delta T$; 所以 $\Delta T=0$, 即 $T_2 = T_1 = 300 \text{ K}$.

(e)由玻意耳定律得 $P_2 = P_1 (V_1/V_2) = 5(2/7) = 1.43 \text{ bar}$.

3.53^D 一密闭绝热容器被一块挡板分成两部分. 其中一部分体积为 5ft³, 压强为 100psia, 温度为 100°F. 另一部分体积为 10ft³ 且被抽成真空. 把挡板抽去后空气充满整个容器. 把空气看成是热力学系统, (a)做了多少(Btu)的功? (b)热传递为多少(Btu)? (c)内能改变了多少(Btu)? (d)最后温度为多少(°F)? (e)最终的压强为多少(psia)? 把空气看成是理想气体.

解 (a)膨胀过程中外界不做功, $W=0$.

(b)因为系统绝热, $Q=0$.

(c)因为 $W=0$ 和 $Q=0$, 所以 $\Delta U=0$.

(d) $0 = \Delta U = m\bar{c}_v \Delta T$; 所以 $\Delta T=0$, 即 $T_2 = T_1 = 100^\circ\text{F}$.

(e)由玻意耳定律得 $P_2 = P_1 (V_1/V_2) = 100(5/15) = 33 \frac{1}{3} \text{ psia}$.

3.54 当压缩一定的气体时, 观察到如下数据:

P/bar	15	30	45	60	75	90
$v/\text{m}^3/\text{kg}$	58	29	19.3	14.45	11.55	9.62

要使 1kg 的空气压强从 10bar 增加到 100bar 需做多少(kJ)的功?

解 因缺少状态方程,根据 Pv 积的结果可以有两种近似的解法:

P/bar	15	30	45	60	75	90
$Pv/(\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg})$	870	870	869	867	866	866

(i) 忽略 Pv 的微小变化, 设 $Pv=866\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg}=86\ 600\text{kJ}/\text{kg}$, 所以

$$w = - \int_{v_1}^{v_2} P dv = \int_{P_1}^{P_2} v dP = (86\ 600) \int_{10}^{100} \frac{dP}{P} = (86\ 600) \ln 10 = 199\ 400\text{kJ}/\text{kg}$$

(ii) 假设 Pv 与 P 成线性减少的关系, $Pv=a-bP$, 所以, $Pdv+v dP=-bdP$, 即

$$-Pdv = (v+b)dP = a(dP/P)$$

因为 b 已被消去, 好像我们又回到方法(i), 但现在 Pv 比 a 小, 常数 a 要比 $86\ 600\text{kJ}/\text{kg}$ 大一 设为 $87\ 100\text{kJ}/\text{kg}$.

则

$$w = 87\ 100 \ln 10 = 200\ 500\text{kJ}/\text{kg}$$

3.55 把 1kg 的空气在 300K 的温度下压缩, 使压强从 5bar 增至 50bar 需做多少功? 运用下列数据.

P/bar	5	10	15	20	25	30	40	50
$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	0.1720	0.08589	0.05719	0.04284	0.03424	0.02851	0.02135	0.01706
$Pv/(\text{kJ}/\text{kg})$	86.61	85.89	85.79	85.68	85.60	85.53	85.40	85.30

解 和题 3.54 相似, $w=c_0 \ln 10$, 其中 c_0 可取 Pv 假定的常量 $Pv(c_0 \approx 85.65\text{kJ}/\text{kg})$ 也可取线性近似的常量($c_0 \approx 86.10\text{kJ}/\text{kg}$). 对于等温压缩的理想气体, $c_0=RT=(0.28704)(300)=86.11\text{kJ}/\text{kg}$.

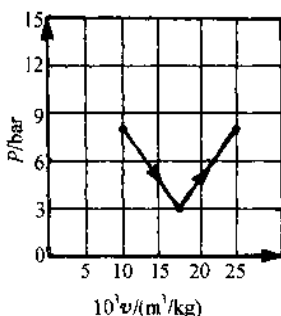


图 3-3

3.56 一活塞-气缸装置中装有 0.5kg 的 R12 进行图 3-3 中的准静态过程. (a) 求热传递的大小(kJ); (b) 热量是流进还是流出 R12?

解 (P, v) 的坐标为: 点 1 (8bar, 0.010m³/kg); 点 2 (3bar, 0.0175m³/kg); 点 3 (8bar, 0.025m³/kg).

解 由封闭系统的第一定律, $q+w=\Delta u$, $w = \int_1^2 P dv + \int_2^3 P dv$
 $= -[(8+3)/2][0.0175-0.010] + [(3+8)/2][0.0250-0.0175]$
 $= 0.0825\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg} = 8.25\text{kJ}/\text{kg}$.

现在求 $\Delta u = u_3 - u_1$. 在点 1 处, $P=8\text{bar}$, $v=0.010\text{m}^3/\text{kg}$; 此时的物态是气液混合态. 由 $u_{\text{mix}}=0.01=(1-x_1)(7.804 \times 10^{-4}) + x_1(0.021)$,

解得 $x_1=0.4325$. 所以, $h_1=(1-0.4325)(431.8) + (0.4325)(565.7) = 489.6\text{kJ}/\text{kg}$, $u_1=h_1-P_1v_1=489.6-(800)(0.010)=481.6\text{kJ}/\text{kg}$. 在点 3 处由表 C6 知 $h_3=583.0\text{kJ}/\text{kg}$, 所以 $u_3=h_3-P_3v_3=583.0-(800)(0.0250)=563.0\text{kJ}/\text{kg}$. 所以, $q=\Delta u-w=(563.0-481.6)-8.25=73.1\text{kJ}/\text{kg}$, 且 $Q=mq=(0.5\text{kg})(73.1\text{kJ}/\text{kg})=36.6\text{kJ}$ (传给 R12).

3.57 下列数据由温度为 500K 的气体测出:

P/bar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	2.298	1.144	0.760	0.567	0.452	0.375	0.320	0.278	0.246	0.221	0.143	0.104
$Pv/(\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg})$	2.298	2.288	2.280	2.268	2.260	2.250	2.224	2.210	2.145	2.089		

要把 1kg 的气体等温压缩使压强从 1.5bar 增至 15bar, 需要做多少(kJ)的功? (a) 根据所给数据; (b) 假设气体是理想气体.

解 (a) 由 3.54(ii) 得到线性方程 $Pv=2.308-10^2 P\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$. 由此可得

$$w = 2.308 \ln(15/1.5) = 5.315\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg} = 531.5\text{kJ}/\text{kg}$$

(b) $w=RT \ln(P_2/P_1)=(0.46151\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})(500\text{K})(\ln 10)=531.3\text{kJ}/\text{kg}$

3.58 下列数据由一个活塞-气缸装置中的流体得到:

P/psia	15	20	40	60	80	100
$v'/(\text{ft}^3/\text{lb})$	57.93	43.44	21.70	11.15	10.33	8.66

当该流体膨胀使压强从 100psia 减至 14.696psia 做了多少 $(\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m)$ 功?

解 如果“流体”是液体可认为不可压缩,则体积几乎不随压强变化;由数据知这是气体, Pv 的值(见下表)变化很小,故由题 3.54(i), $Pv = 868\text{psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lb}_m = 125\,000\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$, 得到 $w = (125\,000) \ln(14.696/100) = -240\,000\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$. 这是外界所做的功,故对外所做的功为 $+240\,000\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$.

P/psia	15	20	40	60	80	100
$Pv/(\text{psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lb}_m)$	869	869	868	867	866	863

- 3.59 (a)如果题 3.58 中的数据是在 1000°F 的恒温下测得,求流体的分子量;(b)该流体是何种物质?

解 (a)如果和题 3.58 一样,该流体被认为是理想气体,则

$$M = \frac{R_v T}{Pv} = \frac{(1545\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot \text{mole} \cdot ^\circ\text{R})(1460^\circ\text{R})}{125\,000\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m} = 18.05\text{lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole}$$

(b)很少有物质的分子量小于 25. 分子量为 $18.016\text{lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole}$ 最可能的分子是水分子. 我们可以从表 A5 中找到完全相同的体积来证明这一假设.

- 3.60 下列数据由 3000K 的流体测得:

P/bar	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$v'/(\text{m}^3/\text{kg})$	205.4	93.4	59.7	43.4	34.1	28.6	23.7	20.6	18.1	16.2

如果要计算把该流体的压强从 0.1bar 通过压缩增至 1bar 所做的功,会遇到什么困难? 如何解释?

解 如果和题 3.54 一样,得到

P/bar	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$Pv/(\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg})$	20.54	18.68	17.31	17.36	17.05	16.80	16.59	16.48	16.29	16.20

可见在压强小于 0.3bar 时, Pv 增加得远比假设的线性关系要快.

显然, $\lim_{P \rightarrow 0} Z > 1$ (或许极限不存在!) 所以这些数据的困难在于它们表明在压强为零时为非理想状态.

如果数据准确,只能解释为蒸汽的电离. 随着温度的变化能够产生不同的物质 (HO , H_2O 等), 或者假设的纯物质实际上是多种成分的混合物.

- 3.61 从一个汽车气缸的状态变化得到下列数据:

P/bar	2	4	6	8	10	15	20
$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	1.376	0.805	0.587	0.470	0.395	0.289	0.231

当气缸中的气体膨胀使得压强从 20bar 减至 2bar 时做了多少 (kJ/kg) 功?

解 由于数据来自一个汽车的气缸,我们假设该过程近似为绝热过程而不是等温过程,所以用 $Pv^k = \text{常数}$ 比用 $Pv = \text{常数}$ 更合适. 实际上 Pv 在 2bar 时为 $275.2\text{kJ}/\text{kg}$ 在 20bar 时为 $462.0\text{kJ}/\text{kg}$ ——变化很大.

为了确定 k ,我们用题 2.348 中的方法:从 2 到 4bar, $k=1.293$;从 4 到 6bar, $k=1.284$;从 6 到 8bar, $k=1.294$;从 8 到 10bar, $k=1.284$;从 10 到 15bar, $k=1.298$;从 15 到 20bar, $k=1.284$. 取平均值为 1.290,由题 3.19(b)得

$$w = \frac{1}{k-1} (P_2 v_2 - P_1 v_1) = \frac{1}{0.290} (275.2 - 462.0) = -644\text{kJ}/\text{kg}$$

所以对外做功为 $-w = +644\text{kJ}/\text{kg}$.

- 3.62^D 蒸汽从 1bar, 500K 被绝热压缩至 10bar, 根据(a)2.348 题中的数据;(b)蒸汽表求所需

的功是多少(kJ/kg)?

解 (a) 运用 $k=1.293$ (见 2.348 题) 并把数据代入题 3.19(b) 的公式,

$$w = \frac{1}{0.293} [(10)(0.387) - (1)(2.298)] = 5.365 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg} = 536.5 \text{ kJ/kg}$$

(b) 对于绝热过程, 由 2.324 题的(1)式得 $-Pdv=du, w=\Delta u$. 压强为 10bar, 熵的值为 7.944 kJ/kg · K (表 A5 中 1bar, 500K 时的值) 时温度为

$$800 + [(7.944 - 7.837)/(7.962 - 7.837)](50) = 842.8 \text{ K}$$

在 10bar, 842.8K 状态下, $h=3537 + (42.8/50)(109) = 3630 \text{ kJ/kg}$, $v_2 = 0.367 + (42.8/50)(0.023) = 0.387 \text{ m}^3/\text{kg}$. 所以

$$u_2 = h_2 - Pv_2 = 3630 - (1000)(0.387) = 3243 \text{ kJ/kg}$$

类似地, 在 1bar, 500K 状态下,

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 2928.7 - (100)(2.298) = 2699 \text{ kJ/kg}$$

所以 $w = u_2 - u_1 = 544 \text{ kJ/kg}$. 与(a)的答案相差 1.3%.

- 3.63^D 蒸汽从 15psia, 500°F 经过绝热压缩压强增至 100psia. (a) 由题 2.349 的数据; (b) 根据蒸汽表求所需的功为多少(ft · lb_f/lb_m)?

解 (a) 由 $k=1.288$ (由 2.349 题得) 和 3.19(b) 公式的值,

$$w = \frac{1}{0.288} [(100 \times 144)(8.72) - (15 \times 144)(38.19)] = 149\,600 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$$

(b) 对于绝热过程, 由题 2.324 的式(1)得 $-Pdv=du$, 即 $u=\Delta u$. 在 100psia 下熵为 1.925 Btu/lb_m · °R (在 15psia, 500°F 时从表 A3 外推得) 温度为

$$1000 + [(1.925 - 1.920)/(1.920 - 1.884)](100) = 1013.9^\circ\text{F}$$

在该温度和 100psia 下, 由相似的推断知

$$h_2 = 1532 + 3.9/(50)(52) = 1546 \text{ Btu/lb}_m \quad v_2 = 8.656 + (13.9/50)(0.605) = 8.824 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

所以把 ft · lb_f 转化为 Btu,

$$u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 1546 - (100 \times 144)(8.824)/778 = 1383 \text{ Btu/lb}_m$$

类似地, 在 15psia, 500°F 下,

$$u_1 = 1287 - (14.7)(144)(38.19)/778 = 1183 \text{ Btu/lb}_m$$

所以 $w = u_2 - u_1 = 200 \text{ Btu/lb}_m = 155\,600 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$. (a) 中的结果误差为 3.9%.

- 3.64^D 用绝热可逆的方式压缩气体, 使饱和气体的压强从 2bar 增至 20bar. 蒸汽的末温为多少(K)?

解 该过程是绝热过程, 所以由表 A5, 在 2bar 下 $s_2 = s_1 = s_g = 7.127 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 在 20bar 时, 这样的 s 出现在 650K 与 700K 之间; 假设满足线性内插

$$T = 650 + [(7.127 - 7.053)/(7.215 - 7.053)](700 - 650) = 673 \text{ K}$$

- 3.65^D 用绝热可逆的方式压缩蒸汽, 使饱和蒸汽的压强从 40psia 增至 100psia. 蒸汽的末温为多少(°F)?

解 因为是绝热过程; 所以从表 A3 知在 40psia 下 $s_2 = s_1 = s_g = 1.679 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 在 100psia 时, 这样的 s 出现在略小于 450°F 的情况下. 假设满足线性内插,

$$T = 400 + [(1.679 - 1.652)/(1.681 - 1.652)](450 - 400) = 447^\circ\text{F}$$

叶轮功

- 3.66 什么是叶轮功?

解 如果推进器, 水轮机, 风车, 汽轮机和其他相似的装置在流体中转动, 就会对流体做功. 由于轮子转动产生的内能等于轮轴做的功, 叶轮功 $W_u = \tau\theta$, 其中 τ 是恒(或平均)力矩, θ 是转动的角度, 单位为弧度. 因为力矩 = 力 × 距离且 θ 无量纲, W_u 具有功的单位.

- 3.67 “对一个封闭绝热且体积恒定的系统中的理想气体做叶轮功, 由热力学第一定律得系统的温度保持不变. 然而实际上温度随着叶轮做功而升高. 为什么?”

解 热力学第一定律为 $Q + W = \Delta U$, 由 $Q=0$ (绝热过程) 和 $W=0$ (闭合系统) 能够得到 $\Delta U=0$,

又因为 $\Delta U = mc_v \Delta T$, 所以 $\Delta T = 0$. 所以热力学第一定律中除了体积功 W_b 还要考虑其他形式的功: $Q + W_b + W_p + \dots = \Delta E$ (或者更恰切地说是 ΔU). 现在有 $Q = W_b = 0$ 和 $E = U$, 所以叶轮功 $W_p = \Delta U = mc_v \Delta T$, W_p 和 T 一起增长.

3. 68 一活塞-气缸装置中空气的状态为 5bar, 300K. 空气中的叶轮在外装置的带动下给气体做功 75kJ/kg. 在该过程中温度保持恒定, 而体积膨胀为原来的两倍. 求热传递是多少 kJ/kg.

解 在本题中, 对单位质量的空气, 第一定律为 $q + W_b + W_p = \Delta u = 0$ (温度不变). 已知 $W_p = 75 \text{ kJ/kg}$, 并且对理想气体由题 3. 19 (a) 得 $W_b = RT \ln(v_1/v_2) = (0.28704)(300)(-\ln 2) = -59.69 \text{ kJ/kg}$ (同题 3. 27). 所以, $q = -W_b - W_p = -(-59.69) - 75.00 = -15.31 \text{ kJ/kg}$. 因为 $q < 0$, 热量从系统传出.

3. 69 密封的容器中装有 5lb_m 的空气. 叶轮对空气做功 15 000ft · lb_f/lb_m, 空气的温度从 60°F 升至 540°F. 开始的压强为 15. 0psia. 求空气内能的变化和热传递, 单位均用 Btu.

解 由于体积功为零 (密封容器) 对该系统用第一定律得 $Q + W_p = \Delta U$. 已知 $W_p = (5 \text{ lb}_m)(15 000 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m)/(778.16 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 96.38 \text{ Btu}$.

如果比热恒定, $\Delta u = c_v \Delta T$. 平均比热为 $\bar{c}_v = \frac{1}{2}(0.2402/1.400 + 0.249/1.380) = 0.1760 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

而在平均温度 (300°F = 760°R) 时的比热 $c_v = 0.2427/1.394 = 0.1741 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. (两种计算中 c_v 均由表 B1 中的 c_p/k 得到.) 利用在恒定体积 (0.1750 ± 0.0010) Btu/lb_m · °R 下的比热, 得到 $\Delta U = m\Delta u = 5(0.1750 \pm 0.0010)(100 - 520) = (420 \pm 2) \text{ Btu}$, 所以 $Q = (420 \pm 2) - 96 = (324 \pm 2) \text{ Btu}$.

3. 70 一闭合系统置于绝热容器中. 先由系统做了 10 000ft · lb_f 的功, 接着叶轮使系统能量增至 12. 85Btu. 求系统内能的改变.

解 由第一定律 ($E = U$), $Q + W_b + W_p = \Delta U$, 即 $0 + (-10 000/778.16) + 12.85 = \Delta U$, 即 $\Delta U = 0 \text{ Btu}$.

3. 71 在一活塞-气缸装置中空气在 15psia, 80°F 时体积为 1ft³. 叶轮对空气做了 5 000ft lb_f 的功并经过一个绝热恒压的过程, 它的末温为多少 (°F)?

解 对于给定的过程, 热力学第一定律为 $W_b + W_p = \Delta U$. 初始条件下根据理想气体定律,

$$m = \frac{P_1 V_1}{RT_1} = \frac{(15 \times 144)(1)}{(53.35)(540)} = 0.0750 \text{ lb}_m$$

这两项功为 $W_b = -P(V_2 - V_1) = mR(T_1 - T_2)$ 和 $W_p = 5 000$; 所以, 第一定律写成

$$mR(T_1 - T_2) + 5000 = \Delta U = m\bar{c}_v(T_2 - T_1) \quad (1)$$

如果假设平均比热的值, 就可以由 (1) 式解出 T_2 . 取一级近似 $\bar{c}_v = (0.1716 \times 778) \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 以及 $T_1 = 540^\circ\text{R}$, 解出 $T_2 = 897^\circ\text{R} = 437^\circ\text{F}$. 但由表 B1 得在 900°R 时, 空气的 $c_v = c_p/k = 0.2460/1.387 = (0.1774 \times 778) \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 所以重新取 \bar{c}_v 等于 0.1745×778 求解式 (1), 得 $T_2 = 893^\circ\text{R} = 433^\circ\text{F}$.

弹力功

3. 72 推导拉伸或者压缩一根线状弹簧做功的表达式.

解 由胡克定律, 当弹簧长为 L 时受力 (拉力) 为 $F = -k_s(L - L_0)$, 其中 k_s 是劲度系数, L_0 是弹簧原长. 所以把弹簧从 L_1 变到 L_2 时所做的功为

$$W = -\int_{L_1}^{L_2} F dL = k_s \int_{L_1}^{L_2} (L - L_0) dL = k_s \int_{x_1}^{x_2} x dx = \frac{k_s}{2} (x_2^2 - x_1^2)$$

其中 $x = L - L_0$ 等于弹簧的伸长.

3. 73^D 如果弹簧的原长为 0. 04m, 则把弹簧从 0. 05m 拉长到 0. 10m 时需要做多少 (J) 功? 劲度系数为 10kN/m.

解 由 3. 72 题的公式,

$$W = \frac{1}{2} (10^4) [(0.10 - 0.04)^2 - (0.05 - 0.04)^2] = 17.5 \text{ J}$$

3. 74^D 如果弹簧的原长为 5ft, 则把弹簧从 7. 5ft 拉长到 10ft 需要多少 (ft · lb_f) 的功? 劲度系

数为 $5\text{lb}_f/\text{in}$.

解 由题 3.72 的公式,

$$W = \frac{1}{2}(5)[(10-5)^2 - (7.5-5)^2] - 46.875\text{lb} \cdot \text{in} = 3.91\text{ft} \cdot \text{lb}_f$$

- 3.75** 一活塞-气缸装置中的空气状态为 1bar , 300K . 气缸直径为 0.2m . 在活塞初始的位置一根弹簧一边贴近活塞的面, 另一边与圆柱中的空气相接触; 活塞面与气缸底相距 0.30m . 如果弹簧劲度系数为 60kN/m , 则压缩空气使之等温变化到原来体积的一半需要做多少功?

解 有两个功在起作用——等温压缩空气做功(W_1)和压缩弹簧做功(W_2). 假设空气是理想气体, 由 3.19(a) 题得 $W_1 = P_1 V_1 \ln(V_1/V_2) = (100\text{kPa})[\pi(0.1\text{m})^2(0.30\text{m})]\ln 2 = 0.653\text{kJ}$. 由 3.72 题得 $W_2 = \frac{1}{2}(60\text{kN/m})[(0.15-0.30)^2 - (0.30-0.30)^2] = 0.675\text{kJ}$, 所以总功为 1.328kJ .

- 3.76** 活塞-气缸装置中的空气处在 15psia , 80°F 的状态. 该气缸的直径为 6in . 如果弹簧的初始位置是一端与活塞面相连, 一端在圆柱内的空气中; 活塞面与气缸底面相距 12in . 通过移动活塞等温压缩空气, 同时也压缩弹簧. 如果需要的总功为 $600\text{ft} \cdot \text{lb}_f$, 则应移动活塞多少(in)距离? 劲度系数为 $2400\text{lb}_f/\text{ft}$.

解 需要做两个功——等温压缩空气所做的功(W_1)和压缩弹簧所做的功(W_2). 假设空气是理想气体, 由题 3.19(a) 得

$$W_1 = P_1 V_1 \ln(V_1/V_2) = (15 \times 144) \left[\pi \left(\frac{1}{4} \right)^2 (1) \right] \ln \frac{1}{1-x_2} = -424.2 \ln(1-x_2)$$

其中 x_2 是未知位移, 单位是 ft . 由 3.72 题得 $W_2 = \frac{1}{2}(2400)(x_2^2 - 0^2) - 1200x_2^2$. 所以 $W_1 + W_2 = 600 = -424.2 \ln(1-x_2) + 1200x_2^2$. 该方程只能通过检验求解. 当 $x_2 = 0.5\text{ft}$, $RHS = 294.0 + 300 = 594\text{ft} \cdot \text{lb}_f$ ——偏小. 当 $x_2 = 0.51\text{ft}$, 右边 $= 302.6 + 312.1 = 614.7\text{ft} \cdot \text{lb}_f$ ——太高. 当 $x = 0.503\text{ft}$, 右边 $= 296.5 + 303.6 = 600.1\text{ft} \cdot \text{lb}_f$ ——很接近. 所以活塞移动了 $(0.503)(12) = 6.04\text{in}$.

电功

- 3.77** (a) 解释“电功”. 为什么这种能量不称之为热? (b) 给出功的基本单位.

解 (a) 在一些热力学教材中把电流流动所产生的能量叫做电功. 热和功的定义是任意的. 在本书中这两个量用相同的符号. 能量, 热和功这些词都可以用于电流的热效应. (b) 最基本的单位是焦耳(J), 可以由电压的单位伏特(V)乘以电流的单位安培(A)和时间的单位秒(s).

- 3.78** 在恒定的压强 5bar 下通电加热空气. 开始时空气 $V = 0.0015\text{m}^3$, 且 $T = 300\text{K}$. 末温为 500K . 如果该过程中有 3kJ 的电能提供给空气, 热传递为多少(kJ)?

解 考虑体积功和电功, 则第一定律可以写成 $Q + W_b + W_e = \Delta U$. 所以,

$$Q = \Delta U - W_b - W_e = \Delta U - (-P\Delta V) - W_e = (\Delta U + P\Delta V + V\Delta P) - V\Delta P - W_e \\ = \Delta H - V\Delta P - W_e = \Delta H - W_e$$

这里 $\Delta P = 0$. 运用空气的理想气体方程

$$m = \frac{PV}{RT} = \frac{(500\text{kN/m}^2)(0.0015\text{m}^3)}{(0.28704\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(300\text{K})} = 0.00871\text{kg}$$

又 $\Delta h = h_{500} - h_{300} = 503.4 - 300.2 = 203.2\text{kJ/kg}$. 所以

$$Q = \Delta H - W_e = m\Delta h - W_e = (0.00871)(203.2) - 3 = -1.23\text{kJ}$$

所以该过程中空气损失了 1.23kJ 的热量.

- 3.79** 证明题 3.78 的解法与直接运用 $Q + W_b + W_e = \Delta U$ 所得的结果一致.

解 $W_b = -P\Delta V$. 假设理想气体进行等压变化, $(0.0015\text{m}^3)/(300\text{K}) = V_2/(500\text{K})$, 所以 $V_2 = 0.0025\text{m}^3$, $W_b = -(500\text{kN/m}^2)[(0.0025 - 0.0015)\text{m}^3] = -0.05\text{kJ}$. 由表 B2, $\Delta u = u_{500} - u_{300} = 359.8 - 214.1 = 145.7\text{kJ/kg}$; m 在题 3.76 求出为 0.00871kg . 所以, $Q = \Delta U - W_b - W_e = (0.00871)(145.7) - (-0.0500) - 3.000 = -1.231\text{kJ}$, 与题 3.78 一致.

- 3.80 一个密封绝热的容器中装有 0.05lb_m 的空气,且初温为 80°F . 容器中一电阻元件获得 $0.50\text{W}\cdot\text{hr}$ 的能量. 不计该元件自身存贮的能量,求:气体的末温是多少 $^\circ\text{F}$.

解 在密闭的容器中无体积功. 因为容器闭合,得 $Q=0$. 运用热力学第一定律得 $W_r = \Delta U = m\Delta u$. 因为 $W_r = 0.50\text{W}\cdot\text{hr} = (0.50\text{W}\cdot\text{hr}) (3.413\text{Btu}/\text{W}\cdot\text{hr}) = 1.707\text{Btu}$. 所以, $\Delta u = 1.707/0.05 = 34.14\text{Btu}/\text{lb}_m$. 因为由表 B1 得 $u_1 = 92.06\text{Btu}/\text{lb}_m$, 可以得到 $u_2 = u_1 + \Delta u = 126.2\text{Btu}/\text{lb}_m$. 此时温度为 $700 + (6.5/8.7)(50) = 737^\circ\text{R} = 278^\circ\text{F}$.

焦耳定律

- 3.81 (a)何为自由膨胀?(b)什么是焦耳定律?(c)焦耳定律的精确度如何?

解 (a)容器中挡板的一面盛有流体,另一面为真空. 若移去挡板,流体就充满整个容器. 因为在膨胀过程中流体不对外做功(它没有推动活塞),所以称之为“自由”膨胀.

(b)由热力学第一定律, $Q+W=\Delta U$. 在自由膨胀中 $W=0$. 如果膨胀过程非常快,或者容器绝热, $Q=0$. 所以 $\Delta U=0$, 也就意味着 $\Delta T=0$. 焦耳定律可以表示成 $(\partial U/\partial V)_T=0$. 说明自由膨胀过程内能不变.

(c)对于理想气体而言内能仅仅是温度的函数, $(\partial U/\partial V)_T=0$, 满足焦耳定律. 对于真实气体, 自由膨胀常使得气体的温度发生变化; 该膨胀过程中有内力做功. 是升温还是降温与焦耳-汤姆孙系数(见第4章和第5章)有关.

- 3.82 两个容器 A, B 通过一根管子相连(图 3-4). 在管口放置一气球. 开始 A 部分气体的压强为 2bar , B 部分气体的压强为零. 突然气球破裂, 求气体内能的变化.

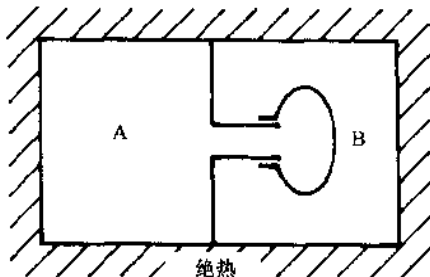


图 3-4

解 在理想气体的自由膨胀中, 焦耳定律为 $(\partial U/\partial V)_T=0$; 所以 $\Delta U=0$. 或者, 对两个容器构成的整个系统运用第一定律, $Q=0$ (绝热), $W=0$ (无体积功); 所以 $Q+W=\Delta U=0$.

混合

- 3.83 A, B 在密闭绝热的容器中热交换. 开始时它们的质量, 恒定体积下的比热, 焓和(绝对)温度分别为 m_A, c_A, h_A, T_A 和 m_B, c_B, h_B 和 T_B . 求系统的末温: (a)与比热的关系; (b)与焓的函数关系; (c)在什么情况下结果无效.

解 (a)对整个系统, $Q=0$; 且没有体积功(密闭容器)和其他作用功, $W=0$. 所以, 由第一定律, $\Delta U = \Delta U_A + \Delta U_B = m_A c_A \Delta T_A + m_B c_B \Delta T_B = 0$. 设 A, B 的初温为 T_{A0} 和 T_{B0} , 末温为 T_2 . 所以,

$$m_A c_A (T_2 - T_{A0}) + m_B c_B (T_2 - T_{B0}) = 0 \quad (1)$$

解得

$$T_2 = \frac{m_A c_A T_{A0} + m_B c_B T_{B0}}{m_A + m_B}$$

设想 A 物质开始时较热, (1)可以写成 $m_A c_A |\Delta T_A| = m_B c_B |\Delta T_B|$, 即损失的热量 = 获得的热量.

(b)对于固体和液体(不包括气体), $c_p \approx c_v$; 所以 $\Delta H = mc_p \Delta T$ 近似等于 $\Delta U = mc_v \Delta T$. 因为表中焓的数据比内能的数据要容易获得, 第一定律近似为 $m_A \Delta h_A + m_B \Delta h_B = 0$, 或 $m_A |\Delta h_A| = m_B |\Delta h_B|$.

(c)如果状态改变,

- 3.84 两块质量, 比热和温度在恒定体积下分别为 m_A, c_A, T_A 和 m_B, c_B, T_B 的不可压缩的物块进行热交换. 证明在达到热平衡的过程中熵的变化为正.

解 整个过程假设是绝热过程, 由 3.83 题(1)式得 $m_A c_A \Delta T_A = -m_B c_B \Delta T_B$. 整个熵变为

$$\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B = \frac{\Delta Q_A}{T_A} + \frac{\Delta Q_B}{T_B} = \frac{m_A c_A \Delta T_A}{T_A} + \frac{m_B c_B \Delta T_B}{T_B} = m_A c_A \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right) (\Delta T_A)$$

但圆括号中的两项都为正或都为负, 所以 $\Delta S > 0$.

3.85 100kg 的 100°C 的水加入到 20kg20°C 的水中, 如果整个过程是绝热过程, 末温为多少?

解 运用题 3.83(b) 中的近似关系以及 $c_A = c_B$ (另一个近似), 另由水物质的 h_f 值得 $20(h_2 - 83.9) + 10(h_2 - 419.1) = 0$, 解得 $h_2 = 195.6 \text{ kJ/kg}$, 所以, $T_2 = 310 + [(195.6 - 154.3)/(196.1 - 154.3)](320 - 310) = 319.88 \text{ K} = 46.73^\circ\text{C}$.

如果更精确些(见题 3.18(a)), 运用水的内能, $20(u_2 - 83.9) + 10(u_2 - 419.0) = 0$, 解得 $u_2 = 195.6 \text{ kJ/kg}$, 由表中 h 和 u 数据的精度(小数点后一位), 得到相同的末温为 46.73°C .

3.86^D 25lb_m212°F 的水加入到 50lb_m70°F 的水中, 如果整个过程是绝热过程, 则末温为多少?

解 运用题 3.83(b) 中的近似方程以及 $c_A = c_B$ (另一个近似), 另由水物质的 h_f 值得 $25(h_2 - 180.2) + 50(h_2 - 38.1) = 0$, 解得 $h_2 = 85.47 \text{ Btu/lb}_m$, 所以, $T_2 = 100 + [(85.5 - 68.0)/(88.0 - 68.0)](120 - 100) = 117.5^\circ\text{F}$.

如果更精确些(见题 3.18(a)), 运用水的内能, $25(u_2 - 180.1) + 50(u_2 - 38.1) = 0$, 解得 $u_2 = 85.44 \text{ Btu/lb}_m$, 所以, $T_2 = 100 + [(85.4 - 68.0)/(88.0 - 68.0)](120 - 100) = 117.4^\circ\text{F}$, 结果相差 0.1°F .

3.87^D 在 1949 年高中习题集中有一道题: 把一块重 10gm 的铂(比热 = 0.03)从炉中拿出并放入到 54gm12°C 的水中, 水装在一等价于 4gm 水的量热器中, 如果末温为 30°C, 求炉子的温度. (a) 什么叫等价于水的量热器, 为什么使用它? (b) 推断出铂的比热单位是什么? (c) 炉子的温度应为多少°C? (d) 你认为结果怎样? (e) 是什么原因使你的答案产生错误?

解 (a) 量热器是一个混合热量的容器, 如果一块热的固体被放到量热器里的水中且量热器的质量不能被忽视, 则必须考虑加热量热器所需的能量. 所谓等价的水是指这部分水与相同质量的量热器有相同的热容量.

(b) 因为温度的单位是°C, 质量的单位是 g, 所以比热的单位是 $\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$, 这也可以通过查阅比较新的比热表验证: 平均值 $0.135 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 转化为 $0.033 \text{ cal/gm} \cdot ^\circ\text{C}$.

(c) 取水的比热为 $1 \text{ cal/gm} \cdot ^\circ\text{C}$, 将损失的能量 = 获得的能量用旧单位表示为, $10(0.03)(T - 30) = (54 + 4)(1)(30 - 12)$, 从而 $T = 3510^\circ\text{C}$, 这就是引用的答案.

(d) 这个答案不正确, 因为铂在 1773°C 就融化了, 它不能像固体那样被移动.

(e) 把热物体投入水中会使部分水汽化, 这个可能性没有被考虑.

3.88^D 一块质量为 0.0220lb_m, 比热为 $0.030 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 的铂块被从炉中移出并投入 54°F 0.119lb_m 的水中, 盛水的容器其热容量等价于 0.0088lb_m 的水, 如果末温为 86°F , 求炉子的温度.

解 取水的比热为 $1 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$,

减少的热量 = 获得的热量

$$(0.0220)(0.030)(T - 86) = (0.119 + 0.009)(1)(86 - 54)$$

$$T = 6292^\circ\text{F}$$

该结果不正确, 因为铂在 3220°F 就融化了, 它不能像固体那样被移动.

3.89^D 用 300K 的热水浇在 40kg273.15K 的冰上, 求当冰刚好融化时所需水的质量.

解 因为没有提供比热和融化时焓的数据, 就必须使用蒸汽表. 当冰刚好被融化时, 温度为 0°C , 或 273.15K. 融化 40kg 冰所需的热量为 $m\Delta h = (40 \text{ kg})[0.0 - (-333.5)] \text{ kJ/kg} = 13340 \text{ kJ}$, 其中 0 kJ/kg 是 273.15K 时的 h_f 值, -333.5 kJ/kg 是 273.15K 时的 h_i 值. 这一热量由质量为 m 的水从 300K 降至 273.15K 获得, 所以 $Q = m\Delta h = m(0.0 - 112.5) = -112.5 \text{ m kJ}$. 这两个热量传递的值相等得 $m = 118.5 \text{ kg}$, 所以需要水的总质量 = $40 + 118.5 = 158.5 \text{ kg}$, 或者约 160kg.

3.90 用 80°F 的热水浇 100lb_m, 32°F 的冰, 求当冰刚好融化时所需水的总质量.

解 因为没有给出比热和融化时焓的数据, 必须使用蒸汽表. 当冰刚好被融化时, 温度为 32°F . 融化这 100lb_m 冰所需的热量为 $m\Delta h = (100 \text{ lb}_m)[0.0 - (-143.3)] \text{ Btu/lb}_m = 14330 \text{ Btu}$, 其中 0 Btu/lb_m 是 32°F 时的 h_f 值, -143.3 Btu/lb_m 是 32°F 时的 h_i 值. 这一热量需要质量为 m 的水温度从 80°F 降至 32°F 得到, $Q = m\Delta h = m(0 - 48.1) = -48.1 \text{ m Btu}$. 由两个热量传递相等得 $m = 297.9 \text{ lb}_m$, 所以需要

水的总质量为 $100 + 297.9 = 397.9 \text{ lb}_m$, 约为 400 lb_m .

- 3.91^D 把 5 kg 260 K 的冰投入到盛有 20 kg 300 K 水的绝热容器中. 求容器中的最终温度和物态. (如果需要可以使用下列数据: 冰的平均比热 $= 2.064 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 水的平均比热 $= 4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 水的溶解焓 $= 333.5 \text{ kJ/kg}$.)

解 解法之一是假设末温为 $0^\circ\text{C} = 273.15 \text{ K}$, 且此时达到热量平衡. 如果需要可以对假设的末温进行修正. 过程为: 水从 300 K 降至 273.15 K 所释放的热量 $= -mc\Delta T = (20 \text{ kg})(4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})[(300 - 273.15) \text{ K}] = -2249 \text{ kJ}$; 冰从 260 K 升至 273.15 K 所吸收的热量 $= mc\Delta T = (5 \text{ kg})(2.064 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})[(273.15 - 260) \text{ K}] = 136 \text{ kJ}$; 净获得的热量为 $2249 - 136 = 2113 \text{ kJ}$.

因为水的溶解焓或潜热为 333.5 kJ/kg , 提供的 2113 kJ 的热量将融化 $2113/333.5 = 6.34 \text{ kg}$ 的冰. 因为只有 5 kg 的冰, 提供的热量足够融化所有的冰. 所以最终容器中的物理状态为液态.

在融化冰的过程中, 用去 $(5 \text{ kg})(333.5 \text{ kJ/kg}) = 1668 \text{ kJ}$ 的热量. 因为共有 2113 kJ 的热量, 所以仍有 445 kJ 的热量没有用掉. 这部分热量就会加热水和融化掉的冰, 总质量为 $20 + 5 = 25 \text{ kg}$, 得到 $\Delta T = Q/mc = (445 \text{ kJ})/(25 \text{ kg})(4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) = 4.25^\circ\text{C}$. 所以末温为 $0 + 4.25 = 4.25^\circ\text{C}$.

- 3.92^D 10 lb_m 温度为 10°F 的冰放入盛有 50 lb_m 80°F 水的绝热容器中. 求容器中的末温和末态. (如有必要可使用冰的平均比热 $0.493 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$, 水的平均比热 $1.00 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$, 水的溶解焓为 143.4 Btu/lb_m .)

解 解法之一是假设末温为 32°F , 此时能量达到平衡. 如有需要可对假设的末温修正. 这样: 水从 80°F 降到 32°F 放出的热量 $= -mc\Delta T = (50 \text{ lb}_m)(1 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F})[(80 - 32)^\circ\text{F}] = 2400 \text{ Btu}$; 把冰从 10°F 加热到 32°F 所需的热量为 $mc\Delta T = (10 \text{ lb}_m)(0.493 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F})[(32 - 10)^\circ\text{F}] = 108 \text{ Btu}$; 得到的净热量为 $2400 - 108 = 2292 \text{ Btu}$.

因为水的溶解焓为 143.4 Btu/lb_m , 得到的 2292 Btu 的热量融化 $2292/143.4 = 15.98 \text{ lb}_m$ 的冰. 因为只有 10 lb_m 的冰, 获得的热量完全足够融化所有的冰. 所以容器中的末态为液态.

在融化冰的过程中, 用去 $(10 \text{ lb}_m)(143.4 \text{ Btu/lb}_m) = 1434 \text{ Btu}$ 的热量. 因获得 2292 Btu 的热量, 所以剩下的热量为 858 Btu . 这些热量将用来加热水和融化的冰. 由于总质量为 $50 + 10 = 60 \text{ lb}_m$, 升高的温度为 $\Delta T = Q/mc = (858 \text{ Btu})/(60 \text{ lb}_m)(1.00 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}) = 14.3^\circ\text{F}$. 末温为 $32 + 14.3 = 46.3^\circ\text{F}$.

- 3.93^D 把 10 kg 260 K 的冰放入盛有 20 kg 300 K 水的绝热容器中. 求容器中的末温和最终状态. (如有需要可以使用下列数据: 冰的平均比热 $2.064 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 水的平均比热 $4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 水的溶解焓为 333.5 kJ/kg .)

解 解法之一是假设末温为 $0^\circ\text{C} = 273.15 \text{ K}$, 根据能量平衡方程求解. 如有必要可以修正这一假设. 该过程中: 水从 300 K 冷却至 273.15 K 放出的热量 $= -mc\Delta T = (20 \text{ kg})(4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})[(273.15 - 300) \text{ K}] = -2249 \text{ kJ}$; 净获得的热量 $= 2249 - 271 = 1978 \text{ kJ}$.

因为水的溶解焓为 333.5 kJ/kg , 获得的 1978 kJ 的热量将融化 $1978/333.5 = 5.93 \text{ kg}$ 的冰. 因为共有 10 kg 的冰, 没有足够的热量融化所有的冰, 所以容器中的最终状态是 0°C 的固液混合物(冰水混合物).

- 3.94^D 20 lb_m 10°F 的冰放入盛有 50 lb_m 80°F 水的绝热容器中. (如果需要可使用: 冰的平均比热 $= 0.493 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$, 水的平均比热 $= 1.00 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$, 水的溶解焓 $= 143.4 \text{ Btu/lb}_m$.)

解 解法之一是假设末温为 32°F 根据能量平衡求解. 如有必要可以对这一假设进行修正. 该过程中: 水从 80°F 降到 32°F 放出的热量 $= -mc\Delta T = (50 \text{ lb}_m)(1 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F})[(80 - 32)^\circ\text{F}] = 2400 \text{ Btu}$; 把冰从 10°F 加热到 32°F 需要的热量 $= mc\Delta T = (20 \text{ lb}_m)(0.493 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F})[(32 - 10)^\circ\text{F}] = 217 \text{ Btu}$; 净获得的热量 $= 2400 - 217 = 2183 \text{ Btu}$.

因为水的溶解焓为 143.4 Btu/lb_m , 获得的 2183 Btu 热量将融化 $2183/143.4 = 15.22 \text{ lb}_m$ 的冰. 因为共有 20 lb_m 的冰, 没有足够的热量融化所有的冰, 所以容器中的最终状态是 32°F 的固液混合物(冰水混合物).

热源和功源

- 3.95 (a) 定义热源和功源; (b) 每种源的熵变是多大? (c) 每种源做功是多少?

解 (a) 一个热源是一个能够提供无限多热量的热力学封闭系统, 可以从该热源获得或向热源放出任意多的热量而不改变其温度. 热源中的这一过程假设是可逆的. 热源只进行热交换. 一个功源是与热源十分相似的只能用来交换功的装置.

(b) 对于热源而言, $\Delta S = \Delta Q/T$; 对于功源而言, $\Delta S = 0$.

(c) 对于热源而言, $W = 0$; 对于功源而言, $W = W$.

- 3.96 热量从一温度为 1000K 的热源传向另一温度为 300K 的热源. 如果温度较高的热源熵变为 -5kJ/K , 求温度较低的热源的熵变.

解 因为高温热源自身内部可逆, $Q = T\Delta S$; 流出热源的热量为 $(1000\text{K})(-5\text{kJ/K}) = -5000\text{kJ}$. 这些热量被第二个热源所吸收, 使其熵变为 $\Delta Q/T = (+5000\text{kJ})/(300\text{K}) = 16.67\text{kJ/K}$.

- 3.97^D 热量从 1800°R 的高温热源流向另一 540°R 的低温热源. 如果低温热源的熵变为 $+5.00\text{Btu}/^\circ\text{R}$, 求高温热源的熵变.

解 对于低温热源, $\Delta S = \Delta Q/T$; 所以, $\Delta Q = T\Delta S = (540)5 = 2700\text{Btu}$. 这一热量来自高温热源, 所以 $\Delta S = \Delta Q/T = -2700/1800 = -1.50\text{Btu}/^\circ\text{R}$.

- 3.98^D 热量从 1000K 的热源流向 300K 的热源. 如果低温热源的熵变是 $+5.00\text{kJ/K}$, 求高温热源的熵变.

解 对于低温热源而言, $\Delta S = \Delta Q/T$; 所以 $\Delta Q = T\Delta S = 300(5) = 1500\text{kJ}$. 这一热量来自高温热源, 所以共熵变为 $\Delta S = \Delta Q/T = -1500/1000 = -1.5\text{kJ/K}$.

- 3.99^D 热量从 1000°F 的高温热源流向 80°F 的低温热源. 该过程总的熵变为 $2.917\text{Btu}/^\circ\text{R}$. 求有多少(Btu)热量流入低温热源?

解 设热量流的大小为 $Q > 0$, 单位为 Btu. 于是, 对于高温热源而言, $\Delta S = -Q/T_h = -Q/1460$. 对于低温热源而言, $\Delta S = Q/T_c = Q/540$. 所以, $Q/540 - Q/1460 = 2.917$, 解得 $Q = 2500\text{Btu}$.

- 3.100^D 热量从 1000K 的高温热源流向 300K 的低温热源. 该过程总的熵变为 4.6667kJ/K . 从高温热源流出多少(kJ)热量?

解 设热量流的大小为 $Q > 0$, 单位为 kJ. 于是, 对于高温热源来说, $\Delta S = -Q/T_h = -Q/1000$. 对于低温热源来说, $\Delta S = Q/T_c = Q/300$. 所以, $Q/300 - Q/1000 = 4.6667$, 解得 $Q = 2000\text{kJ}$.

不可压缩物质

- 3.101 (a) 什么时候物质不可压缩? (b) 不可压缩物质的热力学性质随压强与温度如何改变? (c) 常见不可压缩物质有哪些?

解 (a) 当它的比体积(v)或密度($\rho = 1/v$)不随压强而变时.

(b) (i) $v = v(T)$, $\rho = \rho(T)$. (ii) 不可压缩物质的(比)内能 u 通常在开始的分析中被假设为只与温度和压强有关. (iii)

$$\frac{\partial h}{\partial P} = \frac{\partial}{\partial P}(u + Pv) = \frac{\partial u}{\partial P} + v + P \frac{\partial v}{\partial P} = 0 + v + P(0) = v$$

$$\frac{\partial h}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T}(u + Pv) = u'(T) + Pv'(T)$$

所以, 不可压缩物质的(比)焓随压强和温度而改变. (iv) 假设可逆, $dS = dQ/T$. 代入 $dQ = dU = mc dT$, 其中 [见 3.81(b)] c 是比热, 所以 $dS = mc dT/T$, 或 $\Delta S = mc \ln(T_2/T_1)$. 这说明如果 c 与 P 无关, 则 S 也与 P 无关.

(c) 在简单的热力学计算中, 所有的液体和固体都能被看作不可压缩. 唯一的例外是当温度和压强靠近临界点时, 液体是可压缩的.

- 3.102 500K 时金的比热为 $0.133\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$. 当金的温度从 450K 加热到 550K 时比熵是多少($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)?

解 假设金子不可压缩, 由题 3.101(b) 得出, $1\text{kg} \Delta s = c \ln(T_2/T_1) = (0.133\text{kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(550/450) = 0.027\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$. (在表中该值为 $0.027\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)

3. 103^D 表 C2 给出制冷剂 R12 饱和溶液在 250K 的比熵为 3.198kJ/kg·K; 300K 的比熵为 4.090kJ/kg·K. 则该溶液在 250K 和 300K 之间的平均比热为多少(kJ/kg·K)? 这一结果与文献值 $c_p = 0.934\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ 符合得怎样?

解 假设 R12 不可压缩, $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$, 即 $4.090 - 3.198 = c \ln(300/250)$, 得到 $c = 0.943\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. 这与文献中的值 c_p 相差小于 1%. 但在引用这两个值时要注意两者的区别(见题 4.150 和题 4.151).

3. 104^D 表 C1 给出制冷剂 R12 饱和溶液在 30°F 的比熵为 0.0330Btu/lb_m·°F; 40°F 的比熵为 0.0375Btu/lb_m·°F. 则该溶液在 30°F 和 40°F 之间的平均比热为多少(Btu/lb_m·°F)? 这一结果与文献中的值 $c_p = 0.223\text{Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{F}$ 符合得怎样?

解 假设 R12 不可压缩, $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$, 即 $0.0375 - 0.0330 = c \ln(500/490)$, 解得 $c = 0.223\text{Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{F}$. 这与文献值完全一致; 但在引用计算值和表格中的值时应注意两者的区别(见题 4.150).

3. 105 饱和液态水的比熵在 2bar 时为 1.530kJ/kg·K, 在 3bar 时为 1.672kJ/kg·K. 则把该溶液从 2bar 的饱和压强加热到 3bar 的饱和压强时平均比热是多少(kJ/kg·K)?

解 对于不可压缩的物质, $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$. 由表 4 知, 在 2bar 时, $T_1 = 393.4\text{K}$; 在 3bar 时, $T_2 = 406.7\text{K}$. 所以, $1.672 - 1.530 = c \ln(406.7/393.4)$, 得 $c = 4.272\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. 表中的值为 $c_{pf} = 4.245\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$.

3. 106^D 在 240K 下冰的比熵为 -1.478kJ/kg·K, 比焓为 -400.1kJ/kg. 如果冰在 250K 的比热为 1.935kJ/kg·K, 求冰在 260K 的: (a) 比熵; (b) 比焓.

解 (a) 对于不可压缩的物质而言, $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$. 代入数据, $s_{260} - (-1.478) = 1.935 \ln(260/240)$, 得 $s_{260} = -1.323\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. (这与表 A2 的值完全相同.)

(b) $\Delta h = c_p \Delta T = (1.935\text{kJ/kg}\cdot\text{K})[(260 - 240)\text{K}] = 38.7\text{kJ/kg}$ 且 $h_{260} = h_{240} + \Delta h = -400.1 + 38.7 = -361.4\text{kJ/kg}$. 表 A2 中的值为 -360.5kJ/kg.

3. 107^D 在 10°F 时冰的比熵为 -0.314Btu/lb_m·°F 比焓为 -154.2Btu/lb_m. 如果冰在 20°F 的比热为 0.494Btu/lb_m·°F, 求冰在 30°F 的: (a) 比熵; (b) 比焓.

解 (a) 对于不可压缩的物质而言, $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$. 代入数据, $s_{30} - (-0.314) = 0.494 \ln(490/470)$, 得到 $s_{30} = -0.293\text{Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{F}$. 表中的值为 -0.292Btu/lb_m·°R.

(b) $\Delta h = c_p \Delta T = (0.494\text{Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{F})[(30 - 10)^\circ\text{F}] = 9.88\text{Btu/lb}_m$. 所以 $h_{30} = h_{10} + \Delta h = -154.2 + 9.9 = -144.3\text{Btu/lb}_m$. 表 A1 中的值为 -143.3Btu/lb_m.

3. 108^D 把 350K 的饱和液态水加热压缩至 400K, 100bar. 假设平均比热为 4.22kJ/kg·K, 求末态: (a) 比焓(kJ/kg); (b) 比熵(kJ/kg·K).

解 由表 A2, 在 350K 时 $h_1 = 321.7\text{kJ/kg}$, $s_1 = 1.038\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, 饱和蒸汽压为 0.4163bar. 因为 400K 时的饱和蒸汽压为 2.445bar, 可以推断最终状态是压缩液体.

对于不可压缩的物质其 v 也与 T 无关. 由题 3.101(b) 得到 $\Delta h = v\Delta P + c\Delta T$ 和 $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$. 运用这些公式:

$$\Delta h = (0.001027\text{m}^3/\text{kg})[(10^4 - 41.63)\text{kN/m}^2] + (4.22\text{kJ/kg}\cdot\text{K})[(400 - 350)\text{K}] = 221.2\text{kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + \Delta h = 321.7 + 221.2 = 542.9\text{kJ/kg}$$

$$\Delta s = (4.22\text{kJ/kg}\cdot\text{K}) \ln(400/350) = 0.564\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$s_2 = s_1 + \Delta s = 1.038 + 0.564 = 1.602\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

在表格中 $h_2 = 539.6\text{kJ/kg}$, $s_2 = 1.592\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$.

3. 109^D 160°F 的饱和液态水被加热压缩到 200°F 1500Pa. 假设水的平均比热为 1.004Btu/lb_m·°F, 求末态的: (a) 比焓(Btu/lb_m); (b) 比熵(Btu/lb_m·°F).

解 根据表 A1, 在 160°F 下 $h_1 = 128.0\text{Btu/lb}_m$ 且 $s_1 = 0.231\text{Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{F}$, 饱和蒸汽压为 4.8Pa. 因为 200°F 的饱和蒸汽压为 11.5Pa, 可以推断末态为压缩液体.

对于不可压缩的物质 v 也与 T 无关. 由 3.99(b) 得 $\Delta h = v\Delta P + c\Delta T$ 和 $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$. 由这些公

式:

$$\Delta h = (0.01651 \text{ ft}^3 / \text{lb}_m) [(1500 - 6.7) \text{ lb}_f / \text{in}^2] [(144 / 778) \text{ in}^2 \cdot \text{Btu} / \text{ft}^3 \cdot \text{lb}_f] \\ + (1.004 \text{ Btu} / \text{lb}_m \cdot ^\circ\text{F}) [(200 - 160) ^\circ\text{F}] = 44.7 \text{ Btu} / \text{lb}_m$$

$$h_2 = h_1 + \Delta h = 128.0 + 44.7 = 172.7 \text{ Btu} / \text{lb}_m$$

$$\Delta s = (1.004 \text{ Btu} / \text{lb}_m \cdot ^\circ\text{F}) \ln(860 / 620) = 0.063 \text{ Btu} / \text{lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$$

$$s_2 = s_1 + \Delta s = 0.231 + 0.063 = 0.294 \text{ Btu} / \text{lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$$

表中的值为 $171.5 \text{ Btu} / \text{lb}_m$ 和 $0.292 \text{ Btu} / \text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

3.110^D 10kg100℃的水倒入 20kg20℃的水中, 如果混合过程绝热, 求总熵变(kJ/K).

解 在 3.85 题中末温为 319.9K, 热水的熵变为

$$\Delta S = mc \ln(T_f / T_h) = (10)(4.20) \ln(319.9 / 373.2) = -6.473 \text{ kJ/K}$$

对于冷水, $\Delta S = mc \ln(T_f / T_c) = (20)(4.20) \ln(319.9 / 293.2) = 7.321 \text{ kJ/K}$

所以总熵变为 $7.321 - 6.473 = 0.848 \text{ kJ/K}$.

另一种解法是由表 A2 解得, 在 373.2K, $s_f = 1.307 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 在 319.9K, $s_f = 0.648 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 在 293.2K, $s_f = 0.296 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 所以热水的熵变为

$$\Delta S = m \Delta s = 10(0.648 - 1.307) = -6.59 \text{ kJ/K};$$

冷水的熵变

$$\Delta S = m \Delta s = 20(0.648 - 0.296) = 7.04 \text{ kJ/K}$$

所以总熵变为 $7.04 - 6.59 = 0.45 \text{ kJ/K}$.

这两种解法得到的结果有这么大的差异来自两个方面. 首先, 在比热随温度变化的情况下使用了平均比热. 其次, 饱和液体的比热不等于饱和液体等压下的比热.

3.111^D 25lb_m212°F的水倒入 50lb_m70°F的水中, 如果混合过程中没有热量损失, 总熵变多少(Btu/°R)?

解 在 3.86 题中求得末温为 117.5°F, 热水的熵变为

$$\Delta S = mc \ln(T_f / T_h) = (25)(1.00) \ln(577.2 / 671.7) = -3.799 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$$

冷水的熵变为

$$\Delta S = mc \ln(T_f / T_c) = (50)(1.00) \ln(577.2 / 529.7) = 4.277 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$$

所以总熵变为 $4.277 - 3.799 = 0.478 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$.

另一种解法是用表 A1 中的熵的数据求得. 在 212°F下, $s_f = 0.312 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; 在 117.5°F下, $s_f = 0.160 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; 在 70°F下, $s_f = 0.075 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 热水的熵变为

$$\Delta S = m \Delta s = 25(0.160 - 0.312) = -3.800 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$$

冷水的熵变为

$$\Delta S = m \Delta s = 50(0.160 - 0.075) = 4.250 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$$

所以总熵变为 $4.250 - 3.800 = 0.450 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$.

3.112^D 把 300K 的热水倒入 40kg273.15K 的冰中, 冰刚好融化时的总熵变为多少(kJ/K)?

解 在 3.89 题中计算得需要 118.5kg 的热水, 运用水的恒定比热 $4.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 热水的熵变为

$$mc \ln(T_f / T_h) = (118.5 \text{ kg})(4.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(273.15 / 300) = -46.66 \text{ kJ/K}$$

融化冰而产生的熵变为

$$\Delta S = Q / T = (m h_f) / T = (40 \text{ kg})(333.5 \text{ kJ/kg}) / (273.15 \text{ K}) = 48.84 \text{ kJ/K}$$

所以总熵变为 $48.84 - 46.66 = 2.18 \text{ kJ/K}$.

另一种解法是用表 A2 中熵的数据求得. 在 300K, $s_f = 0.393 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 在 273.15K, $s_f = 0.000 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $s_i = -1.221 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 热水的熵变为

$$\Delta S = m \Delta s = (118.5 \text{ kg})[(0.000 - 0.393) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] = -46.57 \text{ kJ/K}$$

由于融化而产生的熵变为

$$m \Delta s = 40[0 - (-1.221)] = 48.84 \text{ kJ/K}$$

所以总熵变为 $48.84 - 46.57 = 2.27 \text{ kJ/K}$.

3.113^D 把 80°F 的热水倒到 32°F100lb_m 的冰上, 冰刚好融化时的总熵变为多少(Btu/lb_m)?

解 在 3.90 题中求得需要 297.9lb_m 热水, 利用水的恒定比热 $1 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 其熵变为

$$m \ln(T_f/T_h) = (297.9 \text{ lb}_m)(1 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) \ln(491.7/539.7) = -27.75 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

由于融化而产生的熵变为

$$\Delta S = m \Delta s = (m \Delta h_{if})/T = (100)(143.3)/(491.7) = 29.14 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

所以总熵变为 $29.14 - 27.75 = 1.39 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$.

另一种解法是利用表 A1 中的数据求得. 在 80°F , $s_f = 0.094 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; 在 32°F , $s_f = 0.000 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $s_i = -0.292 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 热水的熵变为

$$\Delta S = m \Delta s = (297.9 \text{ lb}_m)[(0.000 - 0.094) \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}] = 28.00 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

由于融化而产生的熵变为

$$m \Delta s = 100[0.000 - (-0.292)] = 29.20 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

所以总熵变为 $29.20 - 28.00 = 1.20 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$.

3. 114^D 5kg 260K 的冰投入盛有 20kg 300K 水的绝热容器中. 总熵变是多少(kJ/K)? 如果需要可以使用: 冰的平均比热 = $2.064 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 水的平均比热 = $4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 水的溶解焓 = 333.5 kJ/kg .

解 在 3.91 题中证明水有足够的能量融化所有投入的冰且剩下的热量可使容器温度为 4.3°C . 熵变计算如下: 把 5kg 冰从 260K 加热到 273.15K 的熵变为

$$m \ln(T_f/T_i) = (5 \text{ kg})(2.064 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(273.15/260) = 0.5092 \text{ kJ/K}$$

在 273.15K 下融化 5kg 冰的熵变为

$$Q/T = (m h_{if})/T = (5 \text{ kg})(333.5 \text{ kJ/kg})/(273.15 \text{ K}) = 6.1047 \text{ kJ/K}$$

20kg 水从 300K 降至 273.15K 的熵变为

$$m \ln(T_f/T_i) = (20 \text{ kg})(4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(273.15/300) = -7.8534 \text{ kJ/K}$$

(20+5)kg 水从 273.15K 升温到 $273.15 + 4.25 = 277.40 \text{ K}$ 的熵变为

$$m \ln(T_f/T_i) = (25 \text{ kg})(4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(277.40/273.15) = 1.6165 \text{ kJ/K}$$

所以总熵变为

$$0.5092 + 6.1047 - 7.8534 + 1.6165 = 0.3770 \text{ kJ/K}$$

3. 115^D 10lb_m 10°F 的冰投入到盛有 50lb_m 80°F 水的绝热容器中. 总熵变是多少(Btu/°R)? 如果需要, 可使用冰的平均比热 $0.493 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 水的平均比热 $1 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 水的溶解焓为 143.4 Btu/lb_m .

解 在 3.92 题中已知水有足够的能量融化投入其中的冰并剩下足够的能量使容器温度升至 46.3°F . 熵变计算如下: 10lb_m 冰温度从 10°F 升高到 32°F 时

$$\text{熵变} = m \ln(T_f/T_i) = (10 \text{ lb}_m)(0.493 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) \ln(492/470) = 0.225 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

在 32°F 下融化冰熵变为

$$Q/T = (m h_{if})/T = (10 \text{ lb}_m)(143.4 \text{ Btu/lb}_m)(492^\circ\text{R}) = 2.915 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

50lb_m 水温度从 80°F 降到 32°F 的

$$\text{熵变} = m \ln(T_f/T_i) = (50 \text{ lb}_m)(1 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) \ln(492/450) = -4.655 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

(50+10)lb_m 水温度从 32°F 升高到 46°F 的

$$\text{熵变} = m \ln(T_f/T_i) = (60 \text{ lb}_m)(1 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) \ln(506/492) = 1.684 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

所以总熵变为

$$0.225 + 2.915 - 4.655 + 1.684 = 0.169 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

3. 116^D 10kg 260K 的冰投入到盛有 20kg 300K 水的绝热容器中. 总熵变是多少(kJ/K)? 如果需要可使用冰的平均比热 $2.064 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 水的平均比热 $4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

解 在 3.93 题中已求得水有足够的能量溶化投入其中的 5.93kg 冰; 末态为 273.15K 的固-液混合态. 熵变计算如下: 10kg 冰从 260K 被加热到 273.15K 熵变为 $m \ln(T_f/T_i) = (10 \text{ kg})(2.064 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(273.15/260) = 1.0188 \text{ kJ/K}$; 在 273.15K 的温度下融化 5.93kg 冰产生的熵变为 $Q/T = (m h_{if})/T = (5.93 \text{ kg})(333.5 \text{ kJ/kg})/(273.15 \text{ K}) = 7.2402 \text{ kJ/K}$; 20kg 水温度从 300K 降到 273.15K 熵变 $= m \ln(T_f/T_i) = (20 \text{ kg})(4.188 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(273.15/300) = -7.8534 \text{ kJ/K}$. 所以, 总熵变 $= 1.0188 + 7.2402 - 7.8534 = 0.4056 \text{ kJ/K}$.

- 3.117^D 20lb_m 温度为 10°F 的冰投入到盛有 50lb_m 温度为 80°F 水的绝热容器中. 总熵变是多少(Btu/°R)? 如果需要可使用冰的平均比热 0.493Btu/lb_m · °R, 水的平均比热 1Btu/lb_m · °R, 水的熔解焓为 143.4Btu/lb_m.

解 由 3.94 题知水中有足够的能量融化投入水中的 15.22lb_m 冰; 末态为 32°F = 492°R 的固液混合物. 熵变计算如下: 20lb_m 水从 10°F 加热到 32°F 的熵变 = $m \ln(T_f/T_i) = (20\text{lb}_m)(0.493\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) \ln(492/470) = 0.451\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; 在 32°F 融化 15.22lb_m 冰产生的熵变 = $Q/T = (mh_{if})/T = (15.22\text{lb}_m)(143.4\text{Btu/lb}_m)/(492^\circ\text{R}) = 4.436\text{Btu/}^\circ\text{R}$; 50lb_m 水从 80°F 冷却到 32°F 熵变 = $m \ln(T_f/T_i) = (50\text{lb}_m)(1\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) \ln(492/540) = -4.655\text{Btu/}^\circ\text{R}$. 所以, 总熵变 = $0.451 + 4.436 - 4.655 = 0.232\text{Btu/}^\circ\text{R}$.

- 3.118 一容器被一个可移动的挡板分成两部分. 容器一部分充满压强为 P_1 , 体积为 V_1 , 温度为 T_1 的理想气体; 另一部分也充满理想气体, 其压强为 P_2 , 体积为 V_2 , 温度为 T_2 . 现移去挡板使两部分气体绝热混合. 证明末态压强和温度分别为

$$P_3 = \frac{P_1 V_1 + P_2 V_2}{V_1 + V_2}, \quad T_3 = \frac{P_1 V_1 + P_2 V_2}{(P_1 V_1/T_1) + (P_2 V_2/T_2)}$$

解 由质量守恒得 $m_3 R = m_1 R + m_2 R$, 即

$$\frac{P_3 (V_1 + V_2)}{T_3} = \frac{P_1 V_1}{T_1} + \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (1)$$

又由 3.81(b) 得, $0 = (R/c_v) \Delta U = m_1 R (T_3 - T_1) + m_2 R (T_3 - T_2)$, 即

$$0 = \frac{P_1 V_1}{T_1} (T_3 - T_1) + \frac{P_2 V_2}{T_2} (T_3 - T_2) \quad (2)$$

同时求解式(1)和(2)得到 P_3 和 T_3 , 即为所求的表达式.

- 3.119^D 容器中有 一半充有 5bar500K 的理想气体; 另一半充有 1bar300K 的相同理想气体. 如果移走挡板使两部分气体绝热混合, 求容器中末态压强(bar)和末态温度(K).

解 由于 3.118 题中的公式只含有体积比, 所以有

$$P_3 = \frac{1}{2} (P_1 + P_2) = 3\text{bar}$$

$$T_3 = \frac{P_1 + P_2}{(P_1/T_1) + (P_2/T_2)} = \frac{5 + 1}{(5/500) + (1/300)} = 450\text{K}$$

- 3.120^D 容器中有一 半充有 75Pa500°F 的理想气体; 另一半充有 15Pa60°F 的相同理想气体. 如果移去挡板使得两部分气体绝热混合, 求容器中气体的末态压强(Pa)和末温(°F).

解 由于 3.118 题中的公式只含体积比, 所以有

$$P_3 = \frac{1}{2} (P_1 + P_2) = 45\text{Pa}$$

$$T_3 = \frac{P_1 + P_2}{(P_1/T_1) + (P_2/T_2)} = \frac{75 + 15}{(75/960) + (15/520)} = 841^\circ\text{R} = 381^\circ\text{F}$$

热力学第二定律

- 3.121 (a) 热力学第二定律的内容是什么? 它与第一定律的区别有哪些? (b) 第二定律如何应用到工程问题中?

解 (a) 热力学第二定律有两种表述——见题 3.122. 一般定义为能量的流动除了具有均衡性还具有方向性, 能量只能沿一定的方向传输. 第一定律决定了能量流动的大小而第二定律决定了它的方向. 第一定律是确定性的而第二定律是统计规律, 但是由于背离第二定律的可能性为零, 两条定律都被认为是绝对正确的.

(b) 通过不同的方法——如比较实际热机与卡诺热机的热力学效率, 也可以通过使用熵原理和检验克劳修斯不等式(题 3.124).

- 3.122 (a) 写出热力学第二定律的(i)克劳修斯表述和(ii)开尔文-普朗克表述; (b) 这两种表述等价吗?

解 (a)(i) 在一个系统中, 能量不可能从低温热源流向高温热源形成一个循环而不引起其他变化。”在这种表述中应注意要满足形成一个循环和不引起其他变化。(ii) “不存在这样的热机, 在完成一个循环后只从热源吸收热量并全部转化为功而不引起其他变化。”

(b) 这两种表述等价: 见题 3. 123.

3. 123 证明违背开尔文-普朗克表述会导致违背克劳修斯表述.

解 图 3-5 违背了开尔文-普朗克表述: 热机 E 从温度为 T_h 的单一热源获得热量 Q_{HE} 并产生等量的功 $W = Q_{HE}$. 于是 E 和 R 合起来的唯一结果是热量从低温热源传向高温热源——违背了克劳修斯表述. 与此相似, 若违背了克劳修斯表述也就会违背开尔文-普朗克表述. 所以, 这两种表述是一致的.

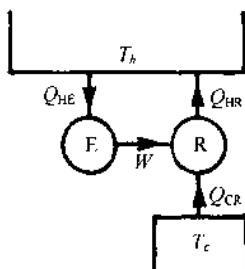


图 3-5

熵增加原理

3. 124 阐述并简要解释熵增加原理.

解 熵增加原理: 在绝热封闭系统中, 不可逆变化使系统的熵增加, 只有绝热可逆过程才会使熵保持不变.

如果系统不是绝热变化, 则它与周围的环境交换热量. 如果把参与交换热量的环境放到一个更大的系统——一个没有质量和能量进出的孤立系统中——于是就可以对该系统运用熵增加原理.

如果在一个封闭系统中存在热交换, 于是 $\Delta S \geq Q/T$, 只有当该过程可逆时才取等号. [这是克劳修斯不等式, 其积分形式见题 3. 160.]

3. 125 一个封闭系统经过如图 3-6 所示的可逆过程, 求热传递的大小.

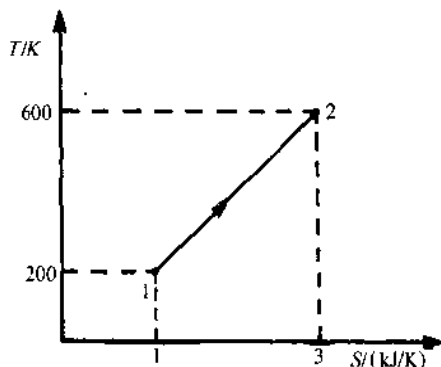


图 3-6

解 对于该可逆过程,

$$Q = \int_1^2 T dS = T(S_2 - S_1) = \frac{600 + 200}{2} (3 - 1) = 800 \text{ kJ}$$

3. 126^D 一个封闭系统经过如图 3-7 所示的可逆过程, 求热传递的大小.

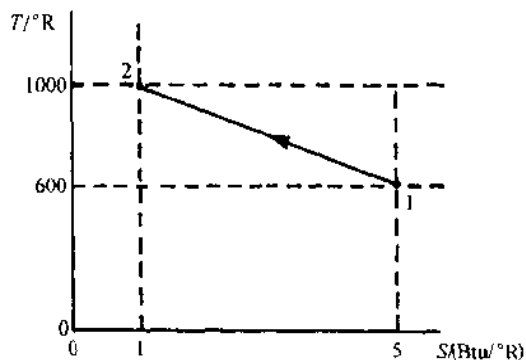


图 3-7

解 对于一个可逆过程

$$Q = \int_1^2 T dS = \bar{T}(S_2 - S_1) = \frac{1000 + 600}{2}(1 - 5) = -3200 \text{ Btu}$$

3. 127^D 由图 3-8 所示的可逆过程求热传递的大小.

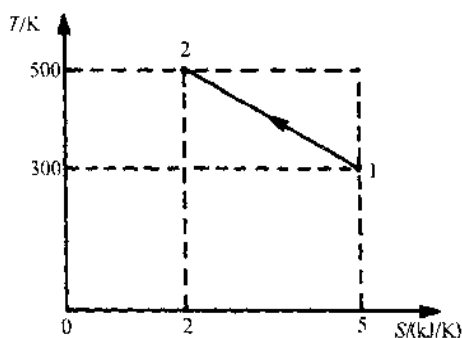


图 3-8

解 对于一个可逆过程

$$Q = \int_1^2 T dS = \bar{T}(S_2 - S_1) = \frac{500 + 300}{2}(2 - 5) = -1200 \text{ kJ}$$

3. 128 一个闭合系统经过图 3-9 所示的可逆过程, 求热传递的大小.

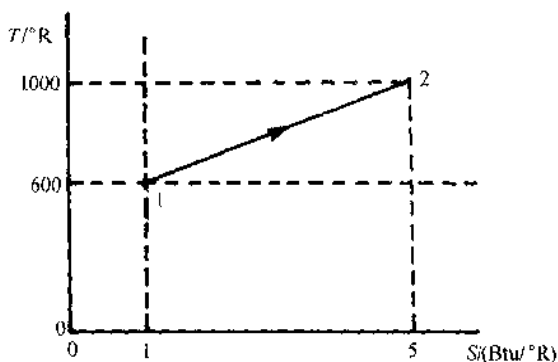


图 3-9

解 对于一个可逆过程

$$Q = \int_1^2 T dS = \bar{T}(S_2 - S_1) = \frac{1000 + 600}{2}(5 - 1) = 3200 \text{ Btu}$$

3. 129^D 流体把 2000 kJ 的热量传给周围温度为 27°C 的环境. 如果流体的熵变为 -5 kJ/K, 则整个过程(只有一个循环): (a) 可能发生且可逆; (b) 可能发生但不可逆; (c) 不可能发生.

解 如果流体是热力学系统, 该系统的熵变为 -5 kJ/K. 周围环境的熵变为 $Q/T = (+2000 \text{ kJ})/(300 \text{ K}) = 6.67 \text{ kJ/K}$. 系统和环境的总熵变为 $-5 + 6.67 = 1.67 \text{ kJ/K}$. 因为总熵变为正值, 所以选(b).

3. 130^D 流体与周围 80°F 的环境交换 1500 Btu 的热量. 如果流体的熵变大小为 2.0 Btu/°R, 则该过程(只有一个循环): (a) 可能发生但不可逆; (b) 可能发生且可逆; (c) 不可能发生; (d) (a) 和 (c) 都有可能, 这取决于热交换的方向.

解 首先假设热量从流体流向周围的环境, 所以 $\Delta S(\text{流体}) = -2.0 \text{ Btu/°R}$, $\Delta S(\text{环境}) = (+1500 \text{ Btu})/(540 \text{ °R}) = 2.78 \text{ Btu/°R}$. 总熵变为 $2.78 - 2.0 = 0.78 \text{ Btu/°R}$, 为正值. 该过程可能发生且不可逆. 如果假设热量从环境流向流体, 则熵变的符号刚好相反总熵变为 -0.78 Btu/°R ——该过程不可能发生.

故选(d).

- 3.131^D 在带有活塞的气缸中装有 1kg 空气与 300K 的热源交换热量. 当对空气做 10kJ 的功, 它的状态由 1bar, 300K 变成 2.5bar, 310K. 已知 $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $c_v = 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $R = 0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 求: (a) 空气的熵变 (kJ/K); (b) 热源的熵变 (kJ/K); (c) 从空气流出的热量 (kJ); (d) 该题正确还是错误? 为什么?

解 (a) 假设空气是理想气体, 由 Tds 方程得 $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1) = 1.005 \ln(310/300) - 0.287 \ln(2.5/1) = -0.2300 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 即 $\Delta S(\text{空气}) = -0.2300 \text{ kJ/K}$.

(b) 对于空气来说, $\Delta U = mc_v \Delta T = (1)(0.718)(310 - 300) = 7.18 \text{ kJ}$. 于是由第一定律, $Q = \Delta U - W = 7.18 - 10 = -2.82 \text{ kJ}$. 这一来自空气的热量被热源吸收, 所以 $\Delta S(\text{热源}) = Q/T = (2.82 \text{ kJ})/(300 \text{ K}) = 0.0094 \text{ kJ/K}$.

(c) 从空气传出的热量已在 (b) 中求出为 2.82 kJ.

(d) 总熵变为 $\Delta S(\text{空气}) + \Delta S(\text{热源}) = -0.2300 + 0.0094 = -0.2206 \text{ kJ/K}$. 因为熵变为负值是不可能的, 故本题错误.

- 3.132 用表 B2 求解题 3.131.

解 (a) $\Delta s = s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln(P_2/P_1) = 6.900 - 6.867 - 0.287 \ln(2.5/1) = -0.230 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

$$\Delta S(\text{空气}) = -0.230 \text{ kJ/K}$$

(b) 对于空气而言, $\Delta u = u_{310} - u_{300} = 221.3 - 214.1 = 7.2 \text{ kJ/kg}$, $\Delta U = 7.2 \text{ kJ}$. 所以由第一定律, $Q = \Delta U - W = 7.2 - 10 = -2.8 \text{ kJ}$. 热量从空气中流出并被热源吸收, 所以

$$\Delta S(\text{热源}) = Q/T = (2.8 \text{ kJ})/(300 \text{ K}) = 0.0093 \text{ kJ/K}$$

(c) 从空气传出的热量在 (b) 中已经求出, 为 2.8 kJ.

(d) 总熵变为 $\Delta S(\text{空气}) + \Delta S(\text{热源}) = -0.230 + 0.009 = -0.221 \text{ kJ/K}$. 由于系统的总熵不可能减少, 所以题目错误.

- 3.133^D 一带活塞的圆柱容器中装有 5lb_m 的空气并与 80°F 的热源交换热量. 当对空气做 10000 ft · lb_f 的功使之状态从 1450 Pa, 80°F 变为 50 Pa, 100°F. 已知 $c_p = 0.240 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $c_v = 0.171 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $R = 0.069 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 求: (a) 空气的熵变 (Btu/°R); (b) 热源的熵变 (Btu/°R); (c) 从空气中传出的热量 (Btu); (d) 题目是否正确? 为什么?

解 (a) 假设空气是理想气体, 由空气的 Tds 方程得 $\Delta S(\text{空气}) = m[c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1)] = 5[0.240 \ln(560/540) - 0.069 \ln(50/14.50)] = 1.1461 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$.

(b) $\Delta U = mc_v \Delta T = 5(0.171)(100 - 80) = 17.1 \text{ Btu}$. 由第一定律, $Q = \Delta U - W = 17.1 - (10000/778) = 4.2 \text{ Btu}$. 流进空气的热量由热源提供, 所以 $\Delta S(\text{热源}) = Q/T = (-4.2)/540 = -0.0078 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$.

(c) 流出空气的热量已在 (b) 中求得, 为 -4.2 Btu (空气吸热).

(d) 总熵变为 $\Delta S(\text{空气}) + \Delta S(\text{热源}) = 1.1461 - 0.0078 = 1.1383 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$, 这是不可能的, 所以题目有错误.

- 3.134^D 一块 50kg 比热为 2kJ/kg 的物体在 500K 时与冰水混合物交换热量. 当物体温度降至 0°C 时, 仍然有冰存在. 如果物体与冰水混合物各自可逆且总过程绝热, 求: (a) 物体的熵变 (kJ/K); (b) 混合物的熵变 (kJ/K); (c) 总熵变 (kJ/K); (d) 总过程可逆吗?

解 (a) 假设物体不可压缩, 由题 3.101(b) 得 $\Delta S(\text{物体}) = mc \ln(T_2/T_1) = (50 \text{ kg})(2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(273.15/500) = -60.46 \text{ kJ/K}$.

(b) 对整个系统 $Q + W = \Delta U$, 因为 Q 和 W 都为零, 所以 $\Delta U = 0$. 但 $\Delta U(\text{物体}) = mc \Delta T = (50 \text{ kg})(2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})[(273.15 - 500) \text{ K}] = -22685 \text{ kJ}$; 所以 $\Delta U(\text{冰水}) = +22685 \text{ kJ}$. 因为冰水自身可逆,

$$\Delta S(\text{冰水}) = Q/T = \Delta U/T = (22685 \text{ kJ})/(273.15 \text{ K}) = 83.05 \text{ kJ/K}$$

(c) $83.05 - 60.46 = 22.57 \text{ kJ/K}$

(d) 不可逆. 一个可逆绝热过程熵不变, 而本题不满足.

- 3.135^D 一块重 100lb_m 比热为 0.50 Btu/lb_m 的物体在 250°F 时与冰水混合物交换热量. 物体温度降至 32°F, 此时仍然存在一些冰. 如果物体和冰水混合物分别可逆且整个过程绝热, 求: (a) 物体的熵变 (Btu/°R); (b) 混合物的熵变 (Btu/°R); (c) 总熵变; (d) 整个

过程可逆吗?

解 (a) 假设物体不可压缩, 由题 3.101(b) 得

$$\Delta S(\text{物体}) = mc \ln(T_2/T_1) = (100 \text{ lb}_m)(0.50 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) \ln(492/710) = -18.34 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

(b) 对整个系统而言, $Q+W=\Delta U$, 而 Q 和 W 都为零, 所以 $\Delta U=0$. 但

$$\Delta U(\text{物体}) = mc\Delta T = (100 \text{ lb}_m)(0.50 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F})[(32-250)^\circ\text{F}] = -10900 \text{ Btu}$$

所以 $\Delta U(\text{冰水}) = -10900 \text{ Btu}$. 因为冰水的吸放热过程可逆, 故

$$\Delta S(\text{冰水}) = Q/T - \Delta U/T = (10900 \text{ Btu})/(492^\circ\text{R}) = 22.15 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

$$(c) \quad 22.15 - 18.34 = 3.81 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

(d) 不可逆: 一个可逆绝热过程的熵不变, 而本题不满足.

- 3.136** 加热器把 1000 kJ 的热量传给盛有 10 kg 0°C 水的容器. 该容器与另一个含有 8 kg 水和 2 kg 冰的混合物的容器处于热平衡. 这两个容器构成的系统与外界绝热. 整个系统的压强为 1 bar. 求: (a) 与加热器接触的容器中的熵变 (kJ/K); (b) 装有冰水的容器中的熵变 (kJ/K); (c) 总熵变 (kJ/K). 如有需要可使用: 冰的平均比热 $2.064 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$, 水的平均比热 $4.188 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$, 水的溶解焓为 $333.5 \text{ kJ}/\text{kg}$.

解 融化 2 kg 冰需要的能量 $Q = m h_{if} = (2 \text{ kg})(333.5 \text{ kJ}/\text{kg}) = 667 \text{ kJ}$, 还剩下 $1000 - 667 = 333 \text{ kJ}$ 的能量加热 $10 + 8 + 2 = 20 \text{ kg}$ 的水. 水升高的温度为 $\Delta T = Q/mc = (333 \text{ kJ})/(20 \text{ kg})(4.188 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}) = 4.0 \text{ K}$.

(a) 与加热器接触的容器中的

$$\text{熵变} = mc \ln(T_f/T_i) = (10 \text{ kg})(4.188 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}) \ln[(273.2 + 4.0)/273.2] = 0.608 \text{ kJ}/\text{K}$$

(b) 盛有冰水混合物的容器中的

$$\begin{aligned} \text{熵变} &= \Delta S_{\text{冰}} + \Delta S_{\text{水}} = Q_{\text{冰}}/T_{\text{冰}} + mc \ln(T_f/T_i) \\ &= 667/273.2 + (10 \text{ kg})(4.188 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}) \ln[273.2 + 4/273.2] = 3.048 \text{ kJ}/\text{K} \end{aligned}$$

$$(c) \quad 0.608 + 3.048 = 3.656 \text{ kJ}/\text{K}$$

- 3.137** 有一不可压缩的物质, 比热为 $1.34 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$, 密度为 $500 \text{ kg}/\text{m}^3$, 开始的状态为 5 bar, 440 K; 当其状态变到 2.5 bar, 270 K 时, 比熵变化了多少 ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)?

解 由题 3.101(b) 得

$$\Delta s = c \ln(T_2/T_1) = (1.34 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}) \ln(270/440) = -0.6544 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

- 3.138^D** 有人说通过某一绝热过程可以使空气从 10 bar, 1000 K 变到 1 bar, 300 K. 判断这种说法是否正确.

解 由表 B2 得对于上述变化而言: $s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln(P_2/P_1) = 6.867 - 8.133 - 0.287 \ln(1/10) = -0.605 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$, 违反了熵原理(题 3.124). 上述说法错误.

- 3.139^D** 有人说通过某一绝热过程可以使空气从 20 Pa, 400°R 变到 40 Pa, 800°R . 判断这种说法是否正确.

解 由表 B1 得对于上述变化而言: $s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln(P_2/P_1) = 1.7348 - 1.5682 - 0.069 \ln(40/20) = 0.1182 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 因为 $s_2 > s_1$, 没有违背熵增加原理(3.124 题); 则该(可逆)过程是可能实现的.

- 3.140^D** 若题 3.138 中的绝热过程末温为 600 K. 则该过程可能吗?

解 现在有 $s_2 - s_1 = 7.574 - 8.133 - 0.287 \ln(1/10) = 0.102 > 0$, 该过程是可能的.

- 3.141^D** 若 3.139 题中的绝热过程末温为 250 Pa. 则该过程可能吗?

解 现在 $s_2 - s_1 = 1.7348 - 1.5682 - 0.069 \ln(250/20) = -0.0077 < 0$, 这违反了熵增原理, 所以该过程不能实现.

- 3.142^D** 一带活塞的圆柱状容器中盛有致冷剂 R12. 开始时 R12 温度为 330 K, 干度为 66%. 液体经过一可逆等温过程, 体积变为原来的三倍. 求所做的功 (kJ/kg).

解 这是一个孤立系统且满足第一定律 $q + w = \Delta u$, 其中 $q = T\Delta s$. 初始比容

$$v_1 = (1-x)v_f + xv_g = (1-0.66)(0.00085) + (0.66)(0.0122) = 0.00834 \text{ m}^3/\text{kg}$$

相应地 $h_1 = (1 - 0.66)(456.8) + (0.66)(571.0) = 534.1 \text{ kJ/kg}$

$$P_1 v_1 = 1417 \text{ kN/m}^2 (0.00834 \text{ m}^3/\text{kg}) = 11.8 \text{ kJ/kg}$$

所以 $u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 534.1 - 11.8 = 522.3 \text{ kJ/kg}$

进一步有 $s_1 = (1 - 0.66)(4.186) + (0.66)(4.541) = 4.420 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

当体积变为原来的三倍时,

$$v_2 = 3v_1 = 0.02502 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad T_2 = T_1 = 330 \text{ K}$$

由表 C6 知此时 $P_2 = 800 \text{ kN/m}^2$, 所以

$$u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 583.0 - (800)(0.0250) = 563.0 \text{ kJ/kg}, \quad s_2 = 4.601 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

所以 $q = T \Delta s = (330)(4.601 - 4.420) = 59.7 \text{ kJ/kg}$

$$\Delta u = 563.0 - 522.3 = 40.7 \text{ kJ/kg},$$

$$w = \Delta u - q = 40.7 - 59.7 = -19.0 \text{ kJ/kg}$$

因为 $w < 0$, 所以 R12 对外做功。

- 3.143^p 一带活塞的气缸中盛有致冷剂 R12. 开始时 R12 的状态为 50psia, 80°F. 液体经过一可逆等温的过程最终体积变为初始体积的三分之一. 求所做的功(Btu/lbm).

解 这是一个孤立系统且满足第一定律 $q - w = \Delta u$, 其中 $q = T \Delta s$. 初始时, 由表 C5 得 v_1

$0.890 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $u_1 = h_1 - P_1 v_1 = (87.81 \text{ Btu/lb}_m) - (50 \times 144)(0.890)/778 = 79.57 \text{ Btu/lb}_m$, $s_1 = 0.1736 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 当体积变为初始状态的三分之一时, $v_2 = 0.890/3 = 0.2967 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 且 $T_2 - T_1 = 80^\circ\text{F}$. 由表 C1 知, 在这个温度下, $v_f < v_2 < v_g$, 所以末态是液-气混合态. 所以 $0.2967 = (1 - x)(0.01228) + (0.411)x$, 即 $x = 0.7133$; 所以 $h_2 = (1 - 0.7133)(26.37) + (0.7133)(85.28) = 68.39 \text{ Btu/lb}_m$, $u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 68.39 - (98.87 + 144)(0.2967)/778 = 62.96 \text{ Btu/lb}_m$, $s_2 = (1 - 0.7133)(0.0548) + (0.7133)(0.1639) = 0.1326 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

就可得到 $q = T \Delta s = (540)(0.1326 - 0.1736) = -24.84 \text{ Btu/lb}_m$, $\Delta u = 62.96 - 79.57 = -16.61 \text{ Btu/lb}_m$, $w = \Delta u - q = -16.61 - (-24.84) = 8.23 \text{ Btu/lb}_m$. 因为 $w > 0$, 所以外界对 R12 做功。

- 3.144 一个带活塞的气缸中盛有致冷剂 R12, 开始的状态为 10bar 压强下的饱和液体. 现在压强保持一定, 热量从 500K 的热源传给容器, 使 R12 的温度达到 348K. (a) R12 的熵变是多少 kJ/kg · K? (b) R12 吸收的热量是多少 kJ/kg? (c) 热源的熵变是多少 kJ/kg · K? (d) 该过程可能发生吗? 若可能是可逆过程还是不可逆过程?

解 对于该绝热过程, $Q = \Delta U - W = (U_2 - U_1) - [P(V_2 - V_1)] = (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1) = H_2 - H_1$; 所以 $Q = \Delta H$, 即 $q = \Delta h$. 在初始状态下, 由表 C4 得 $h_1 = 440.8 \text{ kJ/kg}$ 及 $s_1 = 4.137 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 在末态, 由表 C6 得 $h_2 = 593.5 \text{ kJ/kg}$ 及 $s_2 = 4.619 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

(a) $\Delta s = s_2 - s_1 = 4.619 - 4.137 = 0.482 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

(b) $q = h_2 - h_1 = 593.5 - 440.8 = 152.7 \text{ kJ/kg}$

(c) 因为容器吸收了 152.7 kJ/(kg R12) 的热量, 则热源损失了这么多的热量,

$$\Delta s(\text{res}) = (-152.7)/500 = -0.305 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

[用 -0.305 乘以 R12 的质量, 以 kg 为单位, 就能得到热源的熵变.]

(d) 系统的熵变 $= 0.482 - 0.305 = 0.177 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因为熵变大于零, 所以整个过程不可逆。

- 3.145 10lb_m 40°F 的 R12 饱和蒸汽装在带活塞的圆柱形容器中. 热量从周围温度为 50°F 的大气传入该容器, 最终 R12 的状态为 40°F, 40Pa. 容器对外做功为 2452.1 Btu. 求: (a) 热传递的大小(Btu); (b) R12 的熵变(Btu/°R); (c) 空气的熵变(Btu/°R); (d) 总熵变; (e) 系统对外做功这种说法对吗?

解 这是一个封闭系统问题, 可以运用热力学第一定律 $Q + W = \Delta U$.

(a) 在开始状态下(下标为 1), $u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 172.91 \text{ Btu/lb}_m - (9.308 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2)(3.875 \text{ ft}^3/\text{lb}_m)(778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 66.23 \text{ Btu/lb}_m$.

在末态, $u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 82.15 - (40 \times 144)(1.026)/778 = 74.55 \text{ Btu/lb}_m$

所以, $\Delta U = m \Delta u = (10 \text{ lb}_m)[(74.55 - 66.23) \text{ Btu/lb}_m] = 83.2 \text{ Btu}$

$$Q = \Delta U - W = 83.2 - (-2452.1) = 2535.3 \text{ Btu}$$

(b) $\Delta S = m \Delta s = (10 \text{ lb}_m)[(0.1711 - 0.1753) \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}] = -0.042 \text{ Btu/}^\circ\text{R}$

(c) 由于空气的吸放热过程可逆,

$$\Delta S = Q/T = (-2535.3 \text{ Btu}) / (510^\circ \text{R}) = -4.971 \text{ Btu}/^\circ \text{R}$$

(d)
$$\sum \Delta S = -4.971 - 0.042 = -5.013 \text{ Btu}/^\circ \text{R}$$

(e) 因为 $\sum \Delta S < 0$, 所以不可能对外作功.

- 3.146 R12 原来的状态为 2bar, -15°C , 在一个容积为 0.05 m^3 的容器中被等体加热到 20bar 70°C . 假设 R12 是不可压缩的液体, 具有恒定的比体积 $0.000693 \text{ m}^3/\text{kg}$, 热源的温度为 100°C , 求: (a) R12 的熵变 (kJ/K); (b) 热源的熵变 (kJ/K); (c) 该过程可能发生吗? 为什么?

解 由表 C4 知, 在 2bar 时饱和温度为 260.6K; 所以, 温度为 $-15^\circ \text{C} = 258.2 \text{ K}$ 时, R12 比饱和温度低了 2.4K. 换句话说, R12 是可压缩的液体. 由于没有关于 R12 可压缩状态的表格, 通常在给定的温度而不是给定的压强下选取状态值.

由表 C2 得在 258.2K 下: $h_{f1} = 386.0 \text{ kJ}/\text{kg}$, $s_{f1} = 3.948 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$.

同样, 由于 R12 的末态对应于可压缩液体, 可以根据给定的温度 ($70^\circ \text{C} = 343.2 \text{ K}$) 查得状态值为 $h_{f2} = 471.5 \text{ kJ}/\text{kg}$ 及 $s_{f2} = 4.228 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$.

(a)
$$\Delta S = m(s_{f2} - s_{f1}) = \frac{0.05 \text{ m}^3}{0.000693 \text{ m}^3/\text{kg}} [(4.228 - 3.948) \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}] = 20.2 \text{ kJ}/\text{K}$$

(b) 为求热源的熵变, 必需求出 R12 吸收的热量. 由于 v 恒定体积功为零, 由第一定律得

$$\begin{aligned} q &= u_2 - u_1 = (h_2 - h_1) - (P_2 - P_1)v \\ &= (471.5 - 386.0) - [(2000 - 200) \text{ kPa}] (0.000693 \text{ m}^3/\text{kg}) = 84.2 \text{ kJ}/\text{kg} \end{aligned}$$

所以 $Q = (72.15 \text{ kg})(84.2 \text{ kJ}/\text{kg}) = 6075 \text{ kJ}$, $Q(\text{热源}) = -6075 \text{ kJ}$, $\Delta S(\text{热源}) = (-6075 \text{ kJ}) / (373 \text{ K}) = -16.29 \text{ kJ}/\text{K}$.

(c) 总熵变为 $+20.2 - 16.3 = 3.9 \text{ kJ}/\text{K}$, 大于零, 所以该过程可能发生但不可逆 (由于一定的温度变化而产生了热传递; 见 3.154 题).

- 3.147^b 压强为 5bar 的饱和致冷剂 R12 装在一个密封的容器中. 温度为 400K 的热源对之供热使其温度达到 350K. 求: (a) 末态压强 (bar); (b) R12 比熵的变化 ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$); (c) 热源的熵变 ($\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$); (d) 该过程可能发生吗?

解 在初始状态下, $v_1 = 0.0351 \text{ m}^3/\text{kg}$, $s_1 = 4.551 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$. 因为该过程是等容过程, $v_2 = v_1 = 0.0351 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T_2 = 350 \text{ K}$. 由表 C6 知压强在 6bar 到 8bar 之间, 通过计算得 $P_2 = 6 + [(0.0351 - 0.0377) / (0.0272 - 0.0377)](2) = 6.5 \text{ bar}$, 此时 $s_2 = 4.682 + (0.5/2)(4.667 - 4.682) = 4.678 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$. 所以,

(a) $P_2 = 6.5 \text{ bar}$.

(b) $s_2 - s_1 = 4.678 - 4.551 = 0.127 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$.

(c) $q = \Delta u - w$, 对于密封容器而言 $w = 0$. 在末态, $u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 598.9 - (650 \text{ kPa})(0.0351 \text{ m}^3/\text{kg}) = 576.1 \text{ kJ}/\text{kg}$, 在初态, $u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 558.8 - (500 \text{ kPa})(0.0351 \text{ m}^3/\text{kg}) = 541.3 \text{ kJ}/\text{kg}$. 所以, $q = u_2 - u_1 = 576.1 - 541.3 = 34.8 \text{ kJ}/\text{kg}$. 这一热量是从热源发出的, 所以

$$\Delta s(\text{热源}) = (-34.8 \text{ kJ}/\text{kg}) / (400 \text{ K}) = -0.087 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

(d) $\sum \Delta s = -0.087 + 0.127 = 0.040 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$. 因为 $\sum \Delta s > 0$, 故该过程可能发生.

- 3.148^b 压强为 80Pa 的饱和致冷剂 R12 装在密封的容器中. 热量从 250°F 的热源传出使 R12 的末温为 160°F . 求: (a) 末态压强 (Pa); (b) R12 比熵的变化 ($\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$); (c) 热源的熵变 ($\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$); (d) 这个过程可以实现吗?

解 初态时, $v_1 = 0.507 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $h_1 = 84.00 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, $s_1 = 0.1645 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$. 末态时, $v_2 = v_1 = 0.507 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $T_2 = 160^\circ \text{F}$. 由表 C5 得 $P_2 = 80 + [(0.507 - 0.639) / (0.501 - 0.639)](100 - 80) = 99.1 \text{ Pa}$, 这时 $h_2 = 99.54 + (19.1/20)(98.88 - 99.54) = 98.91 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, $s_2 = 0.1917 + (19.1/20)(0.1873 - 0.1917) = 0.1875 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$. 所以,

(a) $P_2 = 99.1 \text{ Pa}$.

(b) $s_2 - s_1 = 0.1875 - 0.1645 = 0.0230 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$.

(c) R12 在恒定的比体积下

$$\begin{aligned} q &= u_2 - u_1 = (h_2 - h_1) - (P_2 - P_1)v \\ &= (98.91 - 84.00) - [(99.1 - 80.0)\text{lb}_f/\text{in}^2](144\text{in}^2/\text{ft}^2) \\ &\quad \times (0.507\text{ft}^3/\text{lb}_m)/(778\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 13.12\text{Btu}/\text{lb}_m \end{aligned}$$

所以对于热源来说

$$\Delta s = (-13.12\text{Btu}/\text{lb}_m)(710^\circ\text{R}) = -0.019\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

(d) $\sum \Delta s = 0.0230 - 0.019 = 0.004\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 因为总熵变大于零, 所以这是一个可能发生的不可逆过程。

- 3.149^D 一个带活塞的气缸中装有 5bar, 300K 的制冷剂 R12. 液体被有摩擦地压缩, 体积变成最初的 1/5. 在该过程中, 液体放出热量使得温度保持不变. 每千克 R12 传递的热量为 127kJ. 求所做的功(kJ/kg).

解 这个简单的密封系统满足第一定律 $q + w = \Delta u$. 初始状态为 $v_1 = 0.0371\text{m}^3/\text{kg}$, $h_1 = 566.4\text{kJ}/\text{kg}$, 所以 $u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 566.4 - (500\text{kN}/\text{m}^2)(0.0371\text{m}^3/\text{kg}) = 547.8\text{kJ}/\text{kg}$.

对于末态, $v_2 = (1/5)v_1 = 0.00742\text{m}^3/\text{kg}$, $T_2 = T_1 = 300\text{K}$. 由表 C2 得, 在 300K 时 $v_f < v_2 < v_g$, 所以末态是气-液混合态, $v_{\text{mix}} = 0.00742 = (1 - x_2)(0.000768) + x_2(0.0258)$, $x_2 = 0.266$. 所以 $h_2 = (1 - 0.266)(426.0) + (0.266)(563.5) = 462.6\text{kJ}/\text{kg}$, $u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 462.6 - (684.1)(0.00742) = 457.5\text{kJ}/\text{kg}$. 由第一定律得, $w = u_2 - u_1 - q = (457.5 - 547.8) - (-127) = 36.7\text{kJ}/\text{kg}$. 这是压缩功和摩擦功之和.

- 3.150^D 一带活塞的圆柱形容器中装有压强为 60Pa, 干度为 50%. 流体克服摩擦膨胀使末态体积变为原来的四倍. 在该过程中有热量传入使得温度保持恒定. R12 吸热的大小为 38.15Btu/lb_m, 求所做的功(Btu/lb_m).

解 这是一个密封系统, 第一定律可以写成 $q + w = \Delta u$. 在初态, $v_1 = (1 - 0.50)(0.01172) + (0.50)(0.670) = 0.341\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $h_1 = (1 - 0.50)(19.20) + (0.50)(82.30) = 50.75\text{Btu}/\text{lb}_m$, $s_1 = (1 - 0.50)(0.0412) + (0.50)(0.1654) = 0.1033\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 在 60Pa 下饱和温度为 48.6°F.

末态下, $v_2 = 4v_1 = 1.364\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $T_2 = T_1 = 48.6^\circ\text{F}$. 为了求 P_2 , 需要由表 C5 求出两个值. 在 48.6°F 30Pa 下, $v = 1.397 + (8.6/20)(1.464 - 1.397) = 1.426\text{ft}^3/\text{lb}_m$; 在 48.6°F 40Pa 下, $v = 1.026 + (8.6/20)(1.079 - 1.026) = 1.049\text{ft}^3/\text{lb}_m$. 所以当 $v = 1.364\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 时压强为 $30 + [(1.364 - 1.426)/(1.049 - 1.426)](10) = 31.6\text{Pa}$. 用类似的方法得到 $h_2 = 83.93\text{Btu}/\text{lb}_m$.

现在可以求得

$$\begin{aligned} u_2 &= h_2 - P_2 v_2 = 83.93 - (31.6 \times 144)(1.364)/778 = 75.95\text{Btu}/\text{lb}_m \\ u_1 &= h_1 - P_1 v_1 = 50.75 - (60 \times 144)(0.341)/778 = 46.96\text{Btu}/\text{lb}_m \\ w &= (u_2 - u_1) - q = (75.95 - 46.96) - 38.15 = -9.16\text{Btu} \end{aligned}$$

负号表示系统对外作 9.16Btu 的功(克服空气和摩擦阻力).

- 3.151 5kg 的水压强为 1bar, 温度为 400K, 置于带活塞的气缸中. 现将其压缩到 10bar, 热量传给温度恒为 350K 的热源; 水的温度保持在 400K. (a) 传输了多少(kJ)热量? (b) 水的熵变是多少(kJ/K)? (c) 热源的熵变是多少(kJ/K)? (d) 证明该过程可能发生.

解 初态 $s_1 = 7.502\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$; 末态 $s_2 = 1.600\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$.

(a) 对于恒温下(假设)的可逆过程, $Q = T\Delta S = Tm(s_2 - s_1) = (400\text{K})(5\text{kg})[(1.600 - 7.502)\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}] = -11.804\text{kJ}$.

(b) 由(a)知 $\Delta S = -29.51\text{kJ}/\text{K}$.

(c) $\Delta S(\text{热源}) = (+11.804\text{kJ})/(350\text{K}) = 33.73\text{kJ}/\text{K}$.

(d) 该过程的总熵变为 $33.73 - 29.51 = +4.22\text{kJ}/\text{K}$. 正号表明这是一个真实的不可逆过程.

- 3.152^D 20kg 压强为 10bar 温度为 500K 的水装在带活塞的气缸中. 系统做功使压强降至 1bar, 同时从 600K 的热源获得热量. 当装置作了 3400kJ 的功后, 水的末态内能为 40000kJ. (a) 水的熵变是多少(kJ/K)? (b) 传输了多少(kJ)热量? (c) 热源的熵变是多少(kJ/K)? (d) 该题正确吗?

解 (a) $P_2 = 1 \text{ bar}$ 时, $u_2 = 40\,000/20 = 2000 \text{ kJ/kg}$
 $u_{\text{mix}} = 2000 = (1-x_2)(417) + x_2(2506) \quad x_2 = 0.7578$
 所以 $s_2 = (1-0.7578)(1.303) + (0.7578)(7.360) = 5.8930 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
 因为 $s_1 = 6.823 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $\Delta S = m(s_2 - s_1) = (20)(5.8930 - 6.823) = -18.60 \text{ kJ/K}$
 (b) 由第一定律, $Q = U_2 - U_1 - W$. 初态下
 $v_1 = 0.221 \text{ m}^3/\text{kg} \quad h_1 = 2891.2 \text{ kJ/kg}$
 $u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 2891.2 - (1000 \text{ kPa})(0.221 \text{ m}^3/\text{kg}) = 2670.2 \text{ kJ/kg}$
 所以, $Q = (40\,000 \text{ kJ}) - (20 \text{ kg})(2670.2 \text{ kJ/kg}) - (-3400 \text{ kJ}) = -10\,000 \text{ kJ}$
 (c) $\Delta S(\text{热源}) = (+10\,000 \text{ kJ})/(600 \text{ K}) = 16.67 \text{ kJ/K}$
 (d) 总熵变为 $16.67 - 18.60 = -1.93 \text{ kJ/K}$. 负号表明该题目不正确.

3. 153^D 一带活塞的气缸中盛有 50 lb_m 压强为 150 Pa 温度为 450°F 的水. 系统做功使压强降至 14.7 Pa , 同时吸收来自温度为 600°F 的热源的热量. 当容器作了 3000 Btu 的功时, 水的内能为 $42\,500 \text{ Btu}$. (a) 水的熵变是多少 ($\text{Btu}/^\circ\text{R}$)? (b) 传输了多少热 (Btu)? (c) 热源的熵变是多少 ($\text{Btu}/^\circ\text{R}$)? (d) 题目正确吗?

解 (a) 如果 $P_2 = 14.7 \text{ Pa}$ 时, $u_2 = 42\,500/50 = 850 \text{ Btu/lb}_m$, 运用 212°F 或者 14.7 Pa 时表中的数据得到 $u_{\text{mix}} = 850 = (1-x_2)(180.1) + x_2(1078)$, 得 $x_2 = 0.7461$. 所以 $s_2 = (1-0.7461)0.312 + (0.7461)(1.757) = 1.390 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 因为 $s_1 = 1.631 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $\Delta S = m(s_2 - s_1) = (50)(1.390 - 1.631) = -12.05 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$.
 (b) 由第一定律, $Q = U_2 - U_1 - W$. 初态 $v_1 = 3.456 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $h_1 = 1247 \text{ Btu/lb}_m$, $u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 1247 - (150 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2)(3.456 \text{ ft}^3/\text{lb}_m)/(778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 1151 \text{ Btu/lb}_m$. 所以
 $Q = (42\,500 \text{ Btu}) - (50 \text{ lb}_m)(1151 \text{ Btu/lb}_m) - (-3000 \text{ Btu}) = -12050 \text{ Btu}$
 (c) $\Delta S(\text{热源}) = (+12\,050 \text{ Btu})/(1060^\circ\text{R}) = 11.37 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$
 (d) 总熵变为 $11.37 - 12.05 = -0.68 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$, 负值表示该题不正确.

热传导

3. 154 (a) 证明热传导(没有作功的热能传输)是不可逆过程; (b) 能否说温度变化无限小的过程可认为是可逆过程?

解 (a) 假设有稳定的热量流 ($Q > 0$) 从恒温为 T_h 的高温热源流向恒温为 T_c 的低温热源. 则高温热源的熵变为 $\Delta S_h = -Q/T_h$, 低温热源的熵变为 $\Delta S_c = Q/T_c$. 总熵变为 $\sum \Delta S = Q(1/T_c - 1/T_h) > 0$. 由熵增加原理知(3.124 题)该过程是不可逆的.

(b) 当 $T_h - T_c \rightarrow 0$, $\sum \Delta S \rightarrow 0$ (可逆过程), 但 $Q \rightarrow 0$ (没有温差). 所以热流为零的过程是可逆的.

3. 155 在分析热循环时发现热量从温度为 540°R 的热源(内在可逆)流向另一温度为 1800°R 的热源(内在可逆). 前者的熵变为 $-5 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$, 后者的熵变为 $+1.50 \text{ Btu}/^\circ\text{R}$. 判断该论述是否正确.

解 对于 540°R 的热源, 热流量为 $Q = T\Delta S = (540)(-5) = -2700 \text{ Btu}$; 对于 1800°R 的热源, $Q = T\Delta S = (1800)(1.50) = 2700 \text{ Btu}$. 所以该循环仅仅是热量从低温物体传向高温物体, 而没有作功. 这就违反了热力学第二定律(克劳修斯表述; 题 3.122), 所以该论述错误.

3. 156 温度为 1000 K 的热源有可能把 1500 kJ 的热量传给温度为 300 K 的热源吗?

解 可以; 见题 3.154(a).

3. 157^D 温度为 1800°R 的热源有可能把 2700 Btu 的热量传给温度为 540°R 的热源吗?

解 可以; 见题 3.154(a).

3. 158^D 某大学热力学考试有如下问题: “流体把 1000 kJ 的热量传给温度为 250 K 的外界. 如果流体的熵变为 -4 kJ/K , 则整个过程是(只循环一次): (a) 可能发生且是可逆过程; (b) 可能发生但是不可逆过程; (c) 不可能发生. 给出的答案是“ $\sum \Delta S = -4 +$

$(1000/250) = 0$; 选(a).”你同意该答案吗?

解 由于流体把热量传给温度为 250K 的外界, 则它的温度必超过 250K. 所以热传递是由于有一定的温度差而产生——这是一个不可逆过程, 熵变大于零. 可以推出 $\Delta S(\text{环境}) > 1000/250$, 故(b)答案正确.

3. 159^D 某大学热力学考试有如下—道问题: “流体把 950Btu 的热量传给温度为 475°R 的外界. 如果流体的熵变是 $-2\text{Btu}/^\circ\text{R}$, 则整个过程是(只循环一次): (a) 可能发生且是可逆过程; (b) 可能发生但是不可逆过程; (c) 不可能发生. 给出的答案是 “ $\sum \Delta S = -2 + 950/475 = 0$; 选(a).”你同意该答案吗?

解 由于流体把热量传给 475°R 的外界, 流体的温度必超过 475°R. 热传递是由于有一定的温度差而产生——这是一个不可逆过程, 熵变大于零. 可以推出 $\Delta S(\text{环境}) > 950/475$, (b) 是正确答案.

3. 160 说出循环过程的克劳修斯不等式(见题 3. 124).

解 一个闭合系统 Q/T 的循环积分[记作 $\oint (Q/T)$ 或 $\sum (Q/T)$] 小于或等于零.

3. 161 图 3-10 表示一个系统与三个热源交换热量时的可逆循

环. 证明 $\frac{Q_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3}} = \frac{Q_2}{\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}} = \frac{Q_3}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}}$ 不考虑实际过程.

解 对于可逆循环, 克劳修斯不等式写成等式:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} = 0$$

又由第一定律得

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$$

由式(2)求出 Q_3 并代入式(1), 得到

$$Q_1 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_3} \right) = Q_2 \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_2} \right) \quad \text{即} \quad \frac{Q_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_3}} = \frac{Q_2}{\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1}}$$

式(1)、(2)不变, 循环排列下标便得到剩下的式子.

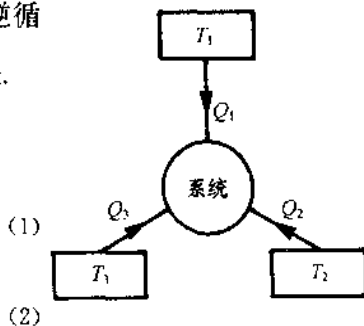


图 3-10

综合题

在题 3. 162~3. 196 中, 选择最佳答案. 所有闭合系统都假设是静止的且没态能量流动.

3. 162 对闭合系统来说, $\sum Q + \sum W = 0$ 表示: (a) 非循环过程的热力学第一定律; (b) 循环过程的热力学第一定律; (c) 循环过程的热力学第二定律.

解 选(b). 如果是非循环过程, $Q + W = \Delta E \neq 0$. 能量的平衡公式不能表示方向.

3. 163 闭合系统循环过程的热量传递为零: (a) 正确; (b) 错误.

解 选(b). 整个循环应满足 $\oint Q + \oint W = \oint \Delta U = 0$.

3. 164 闭合系统循环过程的内能变化为零: (a) 正确; (b) 错误.

解 选(a).

3. 165 方程 $Q + W = \Delta E$ 局限于: (a) 闭合系统; (b) 简单可压缩的闭合系统; (c) 绝热、闭合系统.

解 选(a).

3. 166 一个闭合系统经过一恒压过程, 熵变: (a) 必为正; (b) 必为负; (c) 必为零; (d) 正、负、零均有可能.

解 由于题目中没有交待系统是否绝热, 过程是否可逆, 所以选(d).

3. 167 经过一循环过程, 闭合系统的熵变: (a) 可正可负, 但不为零; (b) 可正可负, 也可为零;

(c)必为正;(d)必为负;(e)必为零;(f)无法确定。

解 熵是态函数,经过一个循环系统回到开始的状态,故选(e)。

- 3.168 经过一绝热过程,闭合系统的熵变:(a)可正可负,也可为零;(b)可正可为零,但不能为负值;(c)总为负;(d)总为零;(e)总为正。

解 选(b)(由熵增加原理得)。

- 3.169 一个可逆过程的熵变总为正:(a)正确;(b)错误。

解 如果该过程同时绝热,则它也是等熵过程。故选(b)。

- 3.170 如果一个过程既是等熵过程又是绝热过程,则它也是可逆过程:(a)正确;(b)错误。

解 根据熵增加原理,选(a)。

- 3.171 Tds 方程只适用于平衡态间的变化:(a)正确;(b)错误。

解 选(a)。

- 3.172 不可逆过程使得绝热系统的熵减少:(a)正确;(b)错误。

解 选(b)。

- 3.173 对公式 $ds = \frac{du}{T} + \frac{P}{T}dv$ 积分得到 Δs , 结论只能在什么情况下正确:(a)只有是理想气体时;(b)当是闭合系统时;(c)当是可逆过程时;(d)对于两个平衡态之间的过程。

解 选(d)。 Tds 方程只对可逆过程成立,但 s 是态函数,所以只要用(连接相同始末点的)可逆路径代替实际积分路径就能获得正确答案。

- 3.174 我们用方程 $Tds = dh - vdP$ 计算熵变,方程适用的范围是:(a)理想气体;(b)稳流系统;(c)可以估算 h 、 v 和 P 的物质;(d)可逆过程;(e)等体过程。

解 选(c)。见题 3.173。

- 3.175 一个闭合系统经过一不可逆的绝热过程,其熵变为:(a)可正可负,也可为零;(b)可为正或零,但不可为负;(c)为负;(d)为正;(e)为零;(f)无法确定。

解 由熵增加原理知选(d)。

- 3.176 流体在一不绝热的气缸中不可逆膨胀,流体的熵变为:(a)零;(b)正值;(c)负值;(d)大于或等于零;(e)无法确定。

解 选(e)。如果系统绝热,则不可逆过程的惟一答案选(b)。

- 3.177 流体在一个不绝热的气缸中被有摩擦地压缩,流体的熵变为:(a)零;(b)正值;(c)负值;(d)大于或等于零;(e)无法确定。

解 与题 3.176 一样,选(e)。

- 3.178 对于一个不可逆过程:(a) $\int_1^2 (dQ/T) < \Delta S$; (b) $\int_1^2 (dQ/T) = \Delta S$; (c) $\int_1^2 (dQ/T) > \Delta S$ 。

解 选(a),即克劳修斯不等式。

- 3.179 方程 $Tds = dh - vdP$ 与下列哪个过程相联系:(a)可逆过程;(b)不可逆过程;(c)可逆过程和不可逆过程。

解 选(a)。见题 2.324。

- 3.180 压缩弹簧的过程是:(a)可逆过程;(b)不可逆过程;(c)两者均可。

解 选(c)。若超过了弹性限度,选(b)。

- 3.181 一绝热的电阻上有电流通过,电阻的熵:(a)增加;(b)不变;(c)减少;(d)无法确定。

解 选(a)。电子和金属点阵间的“摩擦”使得该过程不可逆。

- 3.182 一个有叶轮作功的系统不可逆,所以系统的熵变:(a)为零;(b)大于零;(c)可正可负, .

也可大于零.

解 选(c). 因为没有交待系统是否绝热.

3. 183 空气被装在密闭的容器中, 空气的热量逐渐减少, 则空气的熵变为: (a) 正值; (b) 负值; (c) 零.

解 Tds 方程的积分式之一(对一个可逆过程而言)为 $\Delta s = c_v \ln(T_2/T_1) + R \ln(v_2/v_1)$. 对于空气而言, $v_2 = v_1$; 又由于空气向外传热, $T_2 < T_1$. 所以 $\Delta s < 0$. 选(b).

3. 184 理想气体在一个带活塞的气缸中移动. 容器绝热, 可以忽略热传递. 则气体的温度: (a) 减少; (b) 保持不变; (c) 增加.

解 选(a). 由第一定律 $Q + W = \Delta U$ 得到 $\Delta U < 0$. 而对于理想气体来说, U 是 T 的增函数.

3. 185 等温压缩理想气体, 则其焓变: (a) 总是负值; (b) 有时是负值; (c) 为零; (d) 有时是正值; (e) 总是正值; (f) 无法确定.

解 选(c). $H = U(T) + mRT = H(T)$.

3. 186 流体置于封闭系统中. 在一个可逆过程中流体对外做功: (a) $\Delta V > 0$; (b) $\Delta V < 0$; (c) $\Delta P > 0$; (d) $\Delta P < 0$.

解 $0 > W = - \int P dV = - \bar{P} \Delta V$; 所以 $\Delta V > 0$. 选(a).

3. 187 一个系统经过一不可逆循环. 系统的熵: (a) 增加; (b) 保持不变; (c) 减少; (d) 无法确定.

解 对于任意一个循环, 系统回到初始状态, 所以 $\Delta S = 0$. 选(b).

3. 188 系统经过一不可逆循环. 外界的熵: (a) 增加; (b) 保持不变; (c) 减少; (d) 无法确定.

解 选(a). 不可逆性使得系统外界的熵增加.

3. 189 一个可逆系统向外界传输热量. 系统的熵: (a) 增加; (b) 保持不变; (c) 减少; (d) 无法确定.

解 选(c). 对于一个可逆过程 $\Delta S = Q/T$, 并且已知 $Q < 0$.

3. 190 物体经过一个内在的可逆过程. 则它的熵: (a) 必增加; (b) 保持恒定; (c) 必减少; (d) 可增可减, 也可保持恒定, 取决于该过程.

解 $\Delta S = Q/T$, 其中 Q 不能确定. 选(d).

3. 191 理想“功”源的熵变: (a) 总为正; (b) 总为负; (c) 总为零; (d) 不为零; (e) 可正可负, 也可为零; (f) 无法确定.

解 选(c).

3. 192 一个等熵等体的过程同时也是等温过程: (a) 正确; (b) 错误.

解 选(a). $\Delta U = \Delta S - \bar{P} \Delta V = 0 - 0 = 0$, 所以 $\Delta T = 0$.

3. 193 一闭合系统与一理想热源交换热量. 热源的熵变: (a) 总为正; (b) 总为负; (c) 总为零; (d) 可正可负, 但不为零; (e) 不小于零; (f) 可正可负, 也可为零.

解 对于热源来说, $\Delta S = Q/T$, $Q \neq 0$. 故选(d).

3. 194 热量直接从高温热源传向低温热源. 该过程: (a) 可逆; (b) 不可逆; (c) 两者均可; (d) 无法判断.

解 选(b). (见题 3. 154).

3. 195 理想气体在一气缸被压缩, 容器绝热而没有热传递. 气体的温度: (a) 减少; (b) 保持不变; (c) 增加.

解 由第一定律知, 选(c).

3. 196 一不可压缩液体经过一等温过程压强降低. 液体的熵: (a) 增加; (b) 减少; (c) 保持不

变.

解 

$$\frac{\partial H}{\partial P} = \frac{\partial}{\partial P}(U + PV) = \frac{\partial U}{\partial P} + V + P \frac{\partial V}{\partial P} = V > 0$$

故选(b).

- 3.197 (a)什么是麦克斯韦妖? (b)这一说法违背热力学第二定律吗?

解 

(a)假设一容器被挡板分成两部分,在挡板上有一小门其开关由一精灵控制.该精灵只允许右侧高速运动的分子通过小门到达左侧,结果导致两部分的平均速度(温度)不等.

(b)在不做功的情况下(忽略对门做功),该精灵使得热量从冷物体传向热物体.这就违背了第二定律.

- 3.198 熵和信息论之间有联系吗?

解 

有联系.这一联系的有关概念主要由特里伯斯(Tribus)提出.他发现,当熵的值越大时,信息的不确定性也就越大(最小偏差原理).

- 3.199 什么是吉布斯佯谬?

解 

混合两种不同的气体使熵增加,而混合两种相同的气体却不会.即使气体分子有微小的差别也会使熵增加,确认一个分子的行为就已使之产生变化.

- 3.200 “生命不能存在于处于热力学平衡的系统中”的论述对吗?

解 

显然正确.生命过程存在于开放的系统而不是闭合的系统,开放系统与外界交换质量和能量.见题3.201.

- 3.201 如果“熵增加原理”是正确的,能转化为功的能量数量就越来越少了.这意味着宇宙的最终停滞(“热寂”)吗?

解 

这一问题尚待解决:在小系统中,熵原理是严格成立的;但还没有在所有系统中得到验证.

第四章 真实流体

归一化的压缩系数图

- 4.1 建立一张简明的压缩系数图,压强范围从零到临界值.在图上标出:(a)饱和蒸汽;(b)饱和液体;(c)临界点;(d)一条在临界温度以上的等温线,在这条等温线上,压强从A到B压强增加;(e)一个从C→D的等体过程,在这个过程中压强减小.

解 见图4-1。

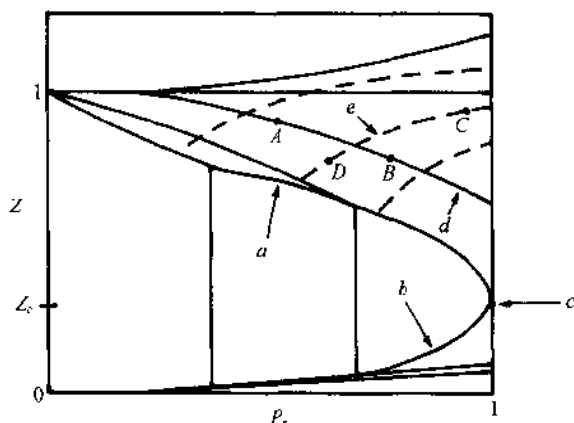


图4-1

- 4.2^D 从题4.1的图中,(a)定义坐标变量;(b)总结建立这张图表的原理.

解 (a)横坐标是简约压强, $P_r = P/P_c$, 在这式子里压强都是绝对的,下标c表示临界值;实线(A,B等)上,简约的绝对温度, $T_r = T/T_c$ 是常数;虚线(CD等)上的简约体积, $v_r = v/(RT_c/P_c)$ 是常数,这里用 RT_c/P_c 的值代替 v_c .

如果比较理想气体和实际或真实气体的性质,对前者来说, $Pv_{id} = RT$,而后者 $Pv_r = ZRT$. 因此, $v_r = Zv_{id}$;即给理想体积增加一个Z参数就可以获得在给定压强和给定温度下实际气体的体积. 简单的说,在相同的压强和温度下, $m_r = (1/Z)m_{id}$.

(b)根据对应态的原理存在一个普适函数 f ,即 $Z/Z_c = f(P/P_c, T/T_c)$. 这个原理受物理上的限制,即(i)平动自由度的量子化效应必须被忽略;(ii)分子必须像理想的球体一样自由旋转;(iii)密度对自由度必须没有影响. 总的来说,简单结构的分子也许会更好的符合这个原理,而极性分子,构成氢化物的分子,化学反应的分子等等就不能很好的符合这个原理了.

表4-1

		T/K					
		100	140	180	250	500	
P / bar	1	Z(chart)	0.9797	0.9927	0.9967	0.9992	1.0003
		Z(ref.)					
	10	Z(chart)	0.0453	0.9205	0.9660	0.9911	1.0034
		Z(ref.)					
	20	Z(chart)	0.0900	0.8297	0.9314	0.9822	1.0074
		Z(ref.)					

- 4.3^D 用Z值图(附录E)和合适的空气临界参数(表D1)完成表4-1.

解 计算这些参数的简约值,

$$P_r = P/P_c = 1/37.7 = 0.027, \quad 10/37.7 = 0.265, \quad 20/37.7 = 0.531$$

$$\text{类似地, } T_r = T/T_c = 100/132.6 = 0.754, \quad 140/132.6 = 1.056, \quad 180/132.6 = 1.357$$

$$250/132.6 = 1.885, \quad 500/132.6 = 3.771$$

除了从 Z 值图中得出的值外,表 4-2 还列出了这些简约值. 1bar, 100K 时的值是从图 E1 中读来的,剩下的值是从图 E3 中读来的. $P_r = 0.265$ 和 0.531 , $T_r = 0.754$ 低于饱和液体的值,是估计的. 另外,如果 Z 很接近 1,很难得到这些值,计算这些值就取 $Z \approx 1$.

表 4-2

		T/K							
		100	140	180	250	500			
P/bar	1	Z(chart)	0.9795	0.980	0.998	≈1	≈1	0.027	
		Z(ref.)	0.9797	0.9927	0.9967	0.9992	1.0003		
	10	Z(chart)	0.039	0.925	0.969	0.990	≈1		0.265
		Z(ref.)	0.0453	0.9205	0.9660	0.9911	1.0034		
	20	Z(chart)	0.089	0.827	0.932	0.9985	≈1		0.531
		Z(ref.)	0.0900	0.8297	0.9314	0.9822	1.0074		
		0.754	1.056	1.357	1.885	3.771			
		T _r							

各值总的都符合得相当好(空气符合对应态原理).

4.4^D 用 Z 值表(附录 E)和合适的空气临界参数(表 D1)完成表 4-3.

表 4-3

		T/°R					
		300	350	400	750	1000	
P / P _{sta}	100	Z(chart)	0.9702	0.9826	0.9894	1.0016	1.0026
		Z(ref.)					
	200	Z(chart)	0.9391	0.9643	0.9789	1.0026	1.0053
		Z(ref.)					
	300	Z(chart)	0.9066	0.9479	0.9687	1.0044	1.0079
		Z(ref.)					
	400	Z(chart)	0.8726	0.9505	0.9588	1.0057	1.0106
		Z(ref.)					
	500	Z(chart)	0.8369	0.9138	0.9491	1.0073	1.0133
		Z(ref.)					

解 计算这些参数的简约值,

$$P_r = P/P_c = 100/547 = 0.183, \quad 200/547 = 0.366, \quad 300/547 = 0.548, \quad 400/547 = 0.731, \\ 500/547 = 0.914$$

$$\text{类似的, } T_r = T/T_c = 300/238.7 = 1.257, \quad 350/238.7 = 1.466, \quad 400/238.7 = 1.676,$$

$$750/238.7 = 3.142, \quad 1000/238.7 = 4.189.$$

除了图 E3 中列出的值外,表 4-4 还列出了这些简约值.

表 4-4

		T, °R						
		300	350	400	750	1000		
P / psia	100	Z(chart)	0.966	0.983	≈1	≈1	≈1	0.183
		Z(ref.)	0.9702	0.9826	0.9894	1.0016	1.0026	
	200	Z(chart)	0.940	0.965	0.975	≈1	≈1	0.366
		Z(ref.)	0.9391	0.9643	0.9789	1.0026	1.0053	
	300	Z(chart)	0.909	0.953	0.979	≈1	≈1	0.518
		Z(ref.)	0.9066	0.9479	0.9687	1.0044	1.0079	
	400	Z(chart)	0.875	0.935	0.960	1.005	1.010	0.731
		Z(ref.)	0.8726	0.9305	0.9588	1.0057	1.0106	
	500	Z(chart)	0.840	0.927	0.951	1.01	1.01	0.914
		Z(ref.)	0.8369	0.9138	0.9491	1.0073	1.0133	
		0.754	1.056	1.357	1.885	3.771		
		T _r						

各值总的都符合得相当好(空气符合对应态原理)。

- 4.5^D 氮的分子量为 17.031。在 1bar, 300K 状态下, 如果这种气体被看成理想气体, 5m³ 体积内含多少(kg)该种物质?

解: $m = MPV/R_g T = (17.031 \text{ kg/kmol})(1 \text{ bar})(5 \text{ m}^3) / (0.08314 \text{ bar m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{K})(300 \text{ K})$
 $= 3.414 \text{ kg}.$

- 4.6^D 如果把 4.5 中的气体看成是真实气体, 重新解 4.5 题。假设临界压强为 112.9bar, 临界温度为 405.7K。

解: $P_r = P/P_c = 1/112.9 = 0.0089$, $T_r = T/T_c = 300/405.7 = 0.7395$ 。按这些数据到图 E2 中去查找, 会发现 $Z \approx 0.993$ 。这时 $m_r = (1/Z)m_d = (1/0.993)(3.414) = 3.438 \text{ kg}.$

- 4.7^D 氮的分子量为 17.031。如果这种气体被看成理想气体, 在 14.696psia, 80°F 状态下, 150ft³ 体积内含多少(lb_m)该种物质?

解: $m_d = MPV/R_g T = (17.031 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole})(14.696 \times 144 \text{ lb}_f / \text{ft}^2)(150 \text{ ft}^3) / (1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_m \text{ mole} \cdot ^\circ \text{R})(540 ^\circ \text{R}) = 6.48 \text{ lb}_m$

- 4.8^D 如果这种气体被看成真实气体, 假设其临界压强为 1638psia, 临界温度为 270.6°F = 730.3°R, 重新解题 4.7。

解: $P_r = P/P_c = 14.696/1638 = 0.0090$, $T_r = T/T_c = 539.7/730.3 = 0.7390$ 。用这个数值到图 E2 中去查找, 会发现 $Z \approx 0.992$ 。所以 $m = (1/Z)m_d = (1/0.992)(6.48) = 6.53 \text{ lb}_m.$

- 4.9^D 在 1bar, 300K 的状态下, 计算氮气的比体积(m³/kg)。(a) 假设它是一种理想气体; (b) 查图 E2。将你的结果和参考表中的值 1450cm³/g 相比较。

解: (a) $R_g = 0.08314 \text{ bar} \cdot \text{m}^3 / \text{kmol} \cdot \text{K}$
 $v_d = R_g T / MP = (0.08314)(300) / (17.031)(1) = 1.465 \text{ m}^3 / \text{kg}$

(b) 从题 4.6, $Z \approx 0.993$, 所以 $v_r = Z v_d = (0.993)(1.465) = 1.454 \text{ m}^3 / \text{kg}.$

表给出的值是 1450 cm³/g = 1.450 m³/kg。理想气体的值超出了该值的 1.0%, 而 Z 图中给出的值超出了 0.3%。

- 4.10^D 在 14.696psia, 80°F 的状态下, 计算氮气的比体积(ft³/lb_m)。 (a) 假设它是一种理想气体; (b) 查 Z 图。将你的结果和参考表中的值 22.90 ft³/lb_m 相比较。

解: (a) $v_d = R_g T / MP = (1545)(540) / (17.031)(14.696 \times 144) = 23.15 \text{ ft}^3 / \text{lb}_m$

(b) 从题 4.8 可知, $Z \approx 0.992$, 所以 $v_r = Z v_d = (0.992)(23.15) = 22.96 \text{ ft}^3 / \text{lb}_m.$

表中给出的值是 $22.90 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 。理想气体的值超出了该值的 1.1% ，而 Z -图中给出的值超出了 0.3% 。

- 4.11^D 在 10.614 bar , 300 K 状态下，计算氮气的比体积 (m^3/kg)。(a) 假设它是一种理想气体；(b) 假设它是一种真实气体；(c) 在这样的温度和压强下文献中包含了两个值 (1.66×10^{-3} 和 $0.12126 \text{ m}^3/\text{kg}$)。将你的结果和这些值做比较。

解 (a) 用 $R_u = 0.08314 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K}$ ，可以得到

$$v_{id} = R_u T / MP = (0.08314)(300) / (17.030)(10.614) = 0.1380 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$(b) \quad P_r = P/P_c = 10.614/112.9 = 0.0940 \quad T_r = T/T_c = 300/405.7 = 0.7395$$

用这些值对应到图 E2 中去查，会得到 $Z \approx 0.921$ 。那么

$$v_r = Z v_{id} = (0.921)(0.1380) = 0.127 \text{ m}^3/\text{kg}$$

(c) 文献里引用的值 $0.12126 \text{ m}^3/\text{kg}$ 是对 300 K 下的饱和气体而言的，此时的饱和气压是 10.614 bar 。理想气体状态方程得到的结果有 13.8% 的误差，然而 Z 图中的结果却有 4.8% 的误差。另外一个值 $1.666 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ 适合饱和液体。 $P_r = 0.0940$ 和图 E3 的饱和液体边界的交点给出了 $Z \approx 0.017$ ，所以 $v_r = Z v_{id} = (0.017)(0.1380) = 0.0023 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。

和表里给出的值相比较有 38% 的差异，这一大的差别可以从题 4.2(b) 中预测到。

- 4.12^D 在 153.0 pisa , 80°F 的状态下，计算单位氮气的比体积 (ft^3/lb_m)。(a) 假设它是一种理想气体；(b) 假设它是一种真实气体；(c) 在文献里两个值 (0.02668 和 $1.955 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$) 在与这样的温度和压强相容的。将你的结果和这些值做比较。

解 (a) $v_{id} = R_u T / MP = (1545)(540) / (17.031)(153.0 \times 144) = 2.223 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$

$$(b) \quad P/P_c = 153.0/1638 = 0.0934 \quad T_r = T/T_c = 0.739$$

用这些值对应到图 E2 中去查，会得到 $Z \approx 0.921$ 。因此 $v_r = Z v_{id} = (0.921)(2.223) = 2.048 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 。

(c) 和引用的较大的值相比较，理想气体的值有 13.7% 的差异， Z 图中的值有 4.8% 的差异。如果从 Z 图中读取饱和液体的值， $P_r = 0.093$ ，可以得到 $Z \approx 0.025$ ，因此 $v_r = Z v_{id} = (0.025)(2.223) = 0.056 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 。在此情况下， Z 图给出了一个没有多少价值的饱和液体体积的数值， $0.02668 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ ；见题 4.2(b)。

- 4.13^D 培理(Perry)的“化学工程师手册”中的表格 3-225 列出了过热二氧化碳在 60 bar , 350 K 的状态下比体积为 $0.0090 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。用 Z 图的方法会得到什么样的值？

解 如果 CO_2 是一种理想气体， $v = v_{id} = R_u T / MP = (0.08314)(350) / (44.010)(60) = 0.1102 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。简约的压强值是 $P_r = P/P_c = 60/73.8 = 0.813$ ，简约的温度值是 $T_r = T/T_c = 350/304.1 = 1.151$ 。在 P_r, T_r 状态下的 Z 参数从 E3 图里得到的是 0.81 。因此 $v_r = Z v_{id} = (0.81)(0.1102) = 0.0089$ 。在这个例子里 Z 图对理想气体的值只是作了稍稍的修正，而它确实给出了一个更准确的结果。

- 4.14^D 工程热力学中关于二氧化碳的表格给出了在 100 pisa , -50°F 的状态下比体积为 $0.90 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 。用 Z 图的方法会得到什么样的值？

解 如果 CO_2 是一种理想气体， $v = v_{id} = R_u T / MP = (1545)(410) / (44.010)(100 \times 144) = 1.000 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 。简约的压强值是 $P_r = P/P_c = 100/1070 = 0.093$ ，简约的温度值是 $T_r = T/T_c = 410/547.4 = 0.749$ 。在这些条件下，图 E2 给出了 $Z = 0.925$ ，所以 $v_r = Z v_{id} = (0.925)(1.000) = 0.925 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 。

- 4.15^D 根据培理的“化学工程师手册”的表格 3-224 列出的二氧化碳在 36.59 bar , 275 K 的状态下饱和液体的比体积为 $1.091 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，饱和气体的比体积为 $0.0097 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。从 Z 图中会得到什么样的值？

解 从表 D1 中查临界值，会得到 $P_r = P/P_c = 36.59/73.8 = 0.496$ ， $T_r = T/T_c = 275/304.1 = 0.904$ 。理想气体的比体积是 $v_{id} = R_u T / MP = (0.08314)(275) / (44.010)(36.59) = 0.0142 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。在图 E3 中， $P_r = 0.496$ 和等温线的交点给出了 Z 的值： $Z_g \approx 0.68$ ， $Z_f \approx 0.08$ 。因为理想气体的比体积是 $0.0142 \text{ m}^3/\text{kg}$ ， $v_r = Z v_{id} = (0.085)(0.0142) = 0.0012 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。这些值和表中的值符合得相当好。

- 4.16^D 玛克斯(Marks)的“机械工程师标准手册”第 8 版的表 37 列出了 CO_2 在 0°F ，

305.76psia时的蒸汽压,饱和液体的密度为 $63.6\text{ft}^3/\text{lb}_m$,饱和气体的密度为 $3.46\text{ft}^3/\text{lb}_m$,用Z图,得出的密度值是什么?

解 $\rho_d = MP/R_u T = (44.010)(305.76 \times 144)/(1545)(460) = 2.727\text{ft}^3/\text{lb}_m$.

在这个条件下,简约的压强值是 $P_r = P/P_c = 305.76/1070 = 0.286$,简约温度是 $T_r = T/T_c = 460/547.4 = 0.840$.在该条件下从图 E3 得到的值是: $Z_g \approx 0.80$,因为 $v_r = Zv_d$,而 $\rho_r = \rho_d/Z_g = 2.727/0.80 = 3.41\text{ft}^3/\text{lb}_m$.该点在Z图中处于过热区域.从饱和气体边界取一个值 0.785,可以得到 $\rho_r = \rho_d/Z_g = 2.727/0.785 = 3.474\text{ft}^3/\text{lb}_m$,这个值稍微高一点.

读取饱和液体的Z值, $Z \approx 0.049$, $\rho_r = \rho_d/Z_g = 2.727/0.049 = 55.7\text{ft}^3/\text{lb}_m$,和文献上的值比低了10%.饱和液体的值有可能存在更大的误差.

- 4.17 一个体积为 10m^3 的容器用来存放二氧化碳.起始温度是 50°C ,压强是 30bar.根据以下条件计算气体的质量(kg): (a)理想气体的规律; (b)压缩系数图; (c)我们希望加入更多的二氧化碳让容器里的质量比一开始的质量增加 25%(根据(b)).温度保持在 50°C .用Z图去计算新的压强.

解 (a)单位用 $\text{bar} \cdot \text{m}^3$, $M_d = MPV/R_u T = (44.010)(30)(10)/(0.08314)(323.2) = 491.4\text{kg}$.

(b) $P_r = P/P_c = 30/73.8 = 0.407$, $T_r = T/T_c = 323.2/304.1 = 1.063$.从图 E3, $Z \approx 0.875$.所以 $m_r = m_d/Z = 491.4/0.875 = 561.6\text{kg}$.

(c)和前面一样, $T_r = 1.063$;但是现在 $Z_1 = m_d/m_r = 491.4/(1.25)(561.6) = 0.70$.使温度 T_r 为 1.063 时 $Z = 0.70$ 位于 $P_r \approx 0.88$ 时 $T_r = 1.05$ 和 $T_r = 1.10$ 的等温线之间,因此 $P = P_r P_c = (0.88)(73.8) \approx 65\text{bar}$.

- 4.18 在 5bar, 400K 时,学生手册上标出的甲醇的比体积是 $0.1898\text{m}^3/\text{kg}$,从Z图中得出的值是多少? 评价其一致性或不足.

解 $v_d = R_u T/MP = (0.08314)(400)/(32.042)(5) = 0.2076\text{m}^3/\text{kg}$.用从表 D1 中得到的临界参数 $P_r = P/P_c = 5/79.5 \approx 0.063$, $T_r = T/T_c = 400/512.6 = 0.780$.从图 E2, $Z = 0.9565$,所以 $v_r = Zv_d = (0.9565)(0.2076) = 0.1986\text{m}^3/\text{kg}$.甲醇是极性分子,所以不要期望它和Z图的值非常一致.

- 4.19 在 20bar, 100K 时,氮的比体积是 $0.0204\text{m}^3/\text{kg}$.用Z图检验这个值.

解 $v_d = R_u T/MP = (0.08314)(100)/(20.179)(20) = 0.0206\text{m}^3/\text{kg}$.简约的压强值是 $P_r = P/P_c = 20/27.6 = 0.275$,简约温度是 $T_r = T/T_c = 100/44.4 = 2.25$,这里使用了表 D1 里的值.在这些条件下,图 E3 给出了 $Z_1 = 0.989$,因此, $v_r = Zv_d = (0.989)(0.0206) = 0.0204\text{m}^3/\text{kg}$,这个值非常一致.氮是单原子气体,Z图的值应该和实际的值符合得很好.

- 4.20^p 俄国的一本出版物列出了在 10bar, 2000K 的状态下,过热钾气体的密度为 $2.4218\text{m}^3/\text{kg}$,从Z图中你能获得什么样的值? 什么影响会导致不同的结果?

解 $v_d = R_u T/MP = (0.08314)(2000)/(39.098)(10) = 0.4253\text{m}^3/\text{kg}$

所以 $\rho_d = 1/v_d = 2.351\text{kg}/\text{m}^3$.用表 D1, $P_r = P/P_c = 10/170 = 0.0588$,图 E3 中, $Z \approx 0.975$;因此 $\rho_r = (1/Z) \rho_d = (1/0.975)(2.351) = 2.411\text{kg}/\text{m}^3$.这两个值有 4.5% 的差别.形成差别的原因是与气体有关.

- 4.21^p 一所海军研究实验室报告列出了在 10atm, 2500°F 的状态下,过热钾蒸汽的比体积是 $5.109\text{ft}^3/\text{lb}_m$,压缩系数是 0.9243.你将得到怎样的值? 什么因素会影响结果?

解 $v_d = R_u T/MP = (1545)(2960)/(39.098)(10 \times 14.696 \times 144) = 5.527\text{ft}^3/\text{lb}_m$

压强用 bar,简约的参数值是 $P_r = P/P_c = (10 \times 1.01325)/170 = 0.0596$, $T_r = T/T_c = 2960/3980 = 0.744$.

从图 E1 或 E2 中可以得到, $Z \approx 0.592$, $v_r = Zv_d = (0.592)(5.527) = 5.262\text{ft}^3/\text{lb}_m$.这个值和表中列出的值 $5.109\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 有差别;值 $Z = 0.592$ 和表中列出的值 0.924 也有区别.形成差别的原因与气体有关.

- 4.22^p 一个体积为 10m^3 的容器用来存放 35bar, 100°C 的丙烷. (a)根据理想气体方程计算容器里气体的质量(kg); (b)用图 E3 更精确地计算质量(kg); (c)如果经过一个等温过程把气体从容器中抽出,用图 E3 计算什么时候容器中气体的质量是刚开始时的一

半.

解 (a) $M_d = MPV/R_u T = (44.097)(35)(10)(0.08314)(373.2) = 497.4 \text{ kg}$

(b) $P_r = P/P_c = 35/42.6 = 0.822$, $T_r = T/T_c = 373.2/370.0 = 1.009$. 在这样的条件下, 图 E3 给出了 $Z \approx 0.611$, $m_s = (1/Z)m_d = (1/0.611)(497.4) = 814.1 \text{ kg}$.

(c) 由于在这个过程中体积是恒量, $m_1 v_1 = (1/2)m_2 v_2$, 或者 $v_2 = 2v_1$, 即 v_{r1}' . 从图 E3 中可得到 $v_{r1}' \approx 0.75$, 所以 $v_{r2}' \approx 1.51$, $T_{r2} = T_{r1} = 1.009$. 从这些式子, 可以得到 $Z_2 \approx 0.80$, 或 $P_{r2} \approx 0.521$. 因此 $P_2 = P_{r2} P_c = (0.521)(42.6) = 22.2 \text{ bar}$.

4. 23^D 一个容积为 10 m^3 的容器用来存放 500psia, 160°F 的丙烷. (a) 根据理想气体方程计算容器里气体的质量 (lb_m); (b) 用图 E3 更精确地计算质量 (lb_m) 的值; (c) 如果经过一个等温过程把气体从容器中抽出, 通过图 E3 计算什么时候容器中气体的质量是刚开始时的一半?

解 (a) $M_d = MPV/R_u T = (44.097)(500 \times 144)(250)/(1545)(660) = 778.4 \text{ lb}_m$

(b) $P_r = P/P_c = 500/618 = 0.809$, $T_r = T/T_c = 660/666 = 0.991$. 在这样的条件下, 图 E3 给出了 $Z \approx 0.575$ (估计是很难的).

$$m_s = (1/Z)m_d = (1/0.575)(778.4) = 1351 \text{ lb}_m$$

(c) 由于在这个过程中体积是恒量, $m_1 v_1 = (1/2)m_2 v_2$, 或者 $v_2 = 2v_1$, 即 $v_{r2}' = 2v_{r1}'$. 从图 E3 中可得到 $v_{r1}' \approx 0.70$, 所以 $v_{r2}' \approx 1.40$, $T_{r2} = T_{r1} = 0.991$. 从这些式子, 可以得到 $Z_2 \approx 0.775$, 或 $P_{r2} = 0.525$. 因此 $P_2 = P_{r2} P_c = (0.525)(618) = 324 \text{ psia}$.

4. 24^D 用图 E3 计算制冷剂 R12 在状态 350K, 1.5, 10, 21.57bar 时的比体积 (m^3/kg), 并将该值和表 C6、C2 中的值进行比较.

解 见表 4-5. 在这里, $v_d = R_u T / MP = (0.08314)(350)/(120.91)P = 0.2407/P$. Z 的值可以从图 E3 中获得, $T_r = T/T_c = 350/385.2 = 0.909$, $P_r = P/P_c = P/41.2 = 0.024, 0.121, 0.243, 0.524$. 又有 $v_s = Z v_d$. 由于物质的高分子量, v_s 和 v 非常一致.

表 4-5

P/bar	1	5	10	21.57
$v_d/(\text{m}^3/\text{kg})$	0.2407	0.0481	0.0240	0.0112
Z	0.975	0.945	0.88	0.70
$v_s/(\text{m}^3/\text{kg})$	0.235	0.0455	0.0211	0.0078
v/table	0.238	0.0454	0.0211	0.0075

4. 25^D 用图 E3 计算制冷剂 R12 在状态 160°F , 10, 50, 100 和 200 和 280psia 时的比体积 (m^3/kg), 并将该值和表 C5、C1 中的值进行比较.

解 见表 4-6. 在这里, $v_d = R_u T / MP = (1545)(620)/(120.91)(144 \times P) = 55.02/P$. Z 的值可以从图 E3 中获得, $T_r = T/T_c = 620/693.4 = 0.894$, $P_r = P/P_c = P/598 = 0.017, 0.084, 0.67, 0.334, 0.468$. 又有 $v_s = Z v_d$. 由于物质的高分子量, v_s 和 v 非常一致.

表 4-6

P/psia	10	50	100	200	280
$v_d/(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	5.502	1.100	0.550	0.2751	0.1965
Z	0.988	0.945	0.905	0.815	0.73
$v_s/(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	5.436	1.040	0.498	0.224	0.143
v/table	5.453	1.053	0.501	0.221	0.136

4. 26^D 用对应态原理计算制冷剂 R12 在压强为 1bar 时饱和液体和饱和气体的比体积 (m^3/kg), 并将该值和关于饱和 R12 的表中列出的值相比较.

解 对应态原理包含了 Z -图的使用, 所以理想气体的体积和压缩系数必须确定. 用从表 D1 中

得到的数据 $v_d = R_u T / MP = (0.08314/120.910)(T/P) = 6.876 \times 10^{-4}(T/P)$, 在 1bar 时, $T_{sat} = 243.0\text{K}$, $v_d = (6.876 \times 10^{-4})(243.0/1) = 0.1671\text{m}^3/\text{kg}$, 其相应的简约压强和简约温度是 $P_r = 1/41.2 = 0.0243$, $T_r = 243.0/385.2 = 0.631$, 查图 E1 得到, 在 1bar 时, 饱和气体在 $P_r = 0.0243$ 的状态下, Z 值为 0.950, 在 $T_r = 0.631$ 时, Z 值为 0.934, 这时, $P_r \approx 0.045$, Z 和 P_r 值的不确定性表明沿着饱和曲线, R12 不遵循对应态原理, 取 Z 值的平均值 0.942, 可以得到 $v_g = Zv_d = (0.942)(0.1671) = 0.157\text{m}^3/\text{kg}$, 表中的值是 $0.160\text{m}^3/\text{kg}$, 取 P_r 的平均值 0.034, 饱和液体的 Z 值约为 0.0065, 因此 $v_f = Zv_d = (0.0065)(0.1671) = 0.0011\text{m}^3/\text{kg}$, 表中的值是 0.0007, 该值非常小, 我们可以得到这样的结论, Z 图给 R12 的饱和或过热气体性质提供了可靠的近似值, 但对液体的 R12 例外。

4. 27^D 用对应态原理计算致冷剂 R12 在压强为 15psia 时饱和液体和饱和气体的比体积(ft^3/lb_m), 并将该值和关于饱和 R12 的表中列出的值相比较。

解 对应态原理包含了 Z 图的使用, 所以理想气体的体积和压缩性系数必须确定, 用从表 D1 中得到的数据 $v_d = R_u T / MP = (1545/120.910)(T/P) = 12.78(T/P)$, 在 15psia 时, $T_{sat} = -20.8^\circ\text{F} = 438.9^\circ\text{R}$, 因此 $v_d = (12.78)[438.9/(15 \times 144)] = 2.597\text{ft}^3/\text{lb}_m$, 其相应的简约压强和简约温度是 $P_r = P/P_c = 15/598 = 0.0251$, $T_r = T/T_c = 438.9/693.4 = 0.633$, 用图 E1, 在 15psia 时饱和气体在 $P_r = 0.025$ 时, Z 等于 0.950, 在 $T_r = 0.633$ 时, Z 等于 0.933, $P_r \approx 0.046$, Z 和 P_r 值的不确定性表明沿着饱和曲线, R12 不遵循对应态原理, 取 Z 值的平均值 0.942, 可以得到 $v_g = Zv_d = (0.942)(2.597) = 2.45\text{ft}^3/\text{lb}_m$, 表中的值是 $2.484\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 。

取 P_r 值的平均值 0.036, 饱和液体的 Z 值约为 0.09, 因此 $v_f = Zv_d = (0.09)(2.597) = 0.231\text{ft}^3/\text{lb}_m$, 表中的值是 0.0108, 非常小, 我们可以得到这样的结论, Z 图给 R12 的饱和及过热气体性质提供了可靠的近似值, 但对液体性质例外。

4. 28^D 在 1bar, 500K 的状态下求水蒸气的压缩系数。

解 从表 A5 可以得到, $v = 2.298\text{m}^3/\text{kg}$; 因此 $Z = MPv/R_u T = (18.016\text{kg}/\text{kmol})(1\text{bar} - 2.298\text{m}^3/\text{kg})/[(0.08314\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K})(500\text{K})] = 0.9959$ 。

4. 29^D 在 14.696psia, 450°F 的状态下求水蒸气的压缩系数。

解 从表 A3 可以得到, $v = 36.72\text{ft}^3/\text{lb}_m$; 因此 $Z = MPv/R_u T = (18.016\text{lb}_m/\text{lb}_m\text{mole})(14.696 \times 144\text{lb}_f/\text{ft}^2)(36.72\text{ft}^3/\text{lb}_m)/(1545\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m\text{mole}^\circ\text{R})(910^\circ\text{R}) = 0.9958$ 。

4. 30^D 用表 D1 求在临界点水蒸气的压缩系数, 用国际单位制。

解 $Z_c = MP_c v_c / R_u T_c = (18.016\text{kg}/\text{kmol})(221.2\text{bar})(0.003170\text{m}^3/\text{kg})/[(0.08314\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K})(647.3\text{K})] = 0.235$

4. 31^D 用表 D1 求在临界点水蒸气的压缩系数, 用 USCS 单位制。

解 $Z_c = MP_c v_c / R_u T_c = (18.016\text{lb}_m/\text{lb}_m\text{mole})(13206 \times 144\text{lb}_f/\text{ft}^2)(0.0506\text{ft}^3/\text{lb}_m)/[(1545\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m\text{mole}^\circ\text{R})(1165.1^\circ\text{R})] = 0.234$ 。

4. 32^D 在 20bar, 500K 的状态下, 求水蒸气的比体积(m^3/kg), 用: (a) 理想气体方程; (b) Z 图读取 Z 的值; (c) Z 图读取 v' ; (d) 表 A5。

解 (a) $v_d = R_u T / MP = (0.08314)(500)/(18.016)(20) = 0.1154\text{m}^3/\text{kg}$
 (b) $P_r = P/P_c = 20/220.5 = 0.091$, $T_r = T/T_c = 500/647.1 = 0.733$, 从图 E2 中可得到 $Z \approx 0.933$, $v_g = Zv_d = (0.9335)(0.1154) = 0.1077\text{m}^3/\text{kg}$ 。
 (c) 从图 E3 中可得到, $v' \approx 7.1$, 所以 $v = (RT_c/P_c)v' = [(0.08314/18.016)(647.1)/220.5](7.1) = 0.0961\text{m}^3/\text{kg}$, 这里 R 用 R_u/M 计算。
 (d) $0.104\text{m}^3/\text{kg}$, 因为 (c) 中 v' 的值很难确定, (b) 的结果与从 Z 图中获得的非常接近。

4. 33^D 在 300psia, 450°F 的状态下, 求水蒸气的比体积(m^3/kg), 用: (a) 理想气体方程; (b) Z 图读取 Z 的值; (c) Z 图读取 v' ; (d) 表 A3。

解 (a) $v_d = R_u T / MP = (1545)(910)/(18.016)(300 \times 144) = 1.806\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 。
 (b) $P_r = P/P_c = 300/3200.094$, $T_r = T/T_c = 910/1164.8 = 0.781$, 从表 E2 中可得到 $Z = 0.930$, $v_g = Zv_d = (0.930)(1.806) = 1.680\text{ft}^3/\text{lb}_m$ 。
 (c) 从图 E3 中可得到, $v' \approx 7.1$, 所以 $v = (RT_c/P_c)v' = [(1545/18.016)(1165)/(3200 \times 144)]$

(7.1) $-1.539 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 这里 R 为 R_u/M . (d) $1.636 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 因为(c)中 v_r' 的值很难确定, (b)的结果和从 Z 图中获得的 Z 一样接近.

4.34^D 用图 E3 完成下面的这张在 650K 状态下, 水蒸气性质的表.

P/bar	20	40	60	80	100	150	200
$Z(\text{chart})$							
$Z(\text{ref})$	0.968	0.937	0.902	0.864	0.824	0.702	0.514

你能得到什么样的结论?

解 临界参数是: $P_c = 221.2 \text{ bar}$, $T_c = 647.3 \text{ K}$. 然后, 用 $T_r = T/T_c = 650/647.3 = 1.004$. 建立起下面的表:

P/bar	20	40	60	80	100	150	200
$P_r = P/P_c$	0.090	0.181	0.271	0.362	0.452	0.678	0.904
$Z(\text{chart})$	0.96	0.935	0.900	0.862	0.83	0.725	0.525

结论包括: (1) 当近似 $Z=1$ 时, 图 E3 很难读准; (2) 从参考资料得到的值和计算得到的值是非常一致的.

4.35^D 用图 E3 完成下面的这张在 800°F 状态下, 水蒸气性质的表.

$P(\text{psia})$	10	100	200	600	1000	1500	2000
$Z(\text{chart})$							
$Z(\text{ref})$	0.9992	0.9919	0.9839	0.9509	0.9162	0.8695	0.8188

你能得到什么样的结论?

解 临界参数是: $P_c = 3206 \text{ psia}$, $T_c = 705.4^\circ\text{F} = 1165.1^\circ\text{R}$. 然后用 $T_r = T/T_c = 1260/1165 = 1.08$. 建立起下面的表:

P/psia	10	100	200	600	1000	1500	2000
$P_r = P/P_c$	0.0031	0.0312	0.0624	0.1871	0.3119	0.4679	0.6238
$Z(\text{chart})$	≈ 1	≈ 1	≈ 1	0.942	0.91	0.865	0.82

结论包括: (1) 当近似 $T_r > 0.8$, $P_r < 0.15$ (图 E1, E2 不包括这个区域) 时, 图 E3 很难读准. (2) 在压强较大的时候, 从参考资料得到的值和计算得到的值是非常一致的.

4.36^D 将 200bar, 1300K 的水蒸气在一个刚性的容器里冷却, 直到压强为 100bar. 如果水蒸气的临界参数是 $P_c = 220.6 \text{ bar}$, $T_c = 647.1 \text{ K}$. (a) 在 Z 图中画出该过程的曲线, 清楚地表明初态(1)和末态(2); (b) 用 Z 图计算末态的温度(K); (c) 用理想气体方程计算末态的温度(K); (d) 如果初态水蒸气的比体积是 $0.0030 \text{ m}^3/\text{kg}$, 根据水蒸气表, 末态的温度是多少(K)?

解 (a) 从初始条件有, $P_{r1} = P_1/P_c = 200/220.6 = 0.907$, $T_{r1} = T_1/T_c = 1300/647.1 = 2.009$. 起始点在图 4-1 中 C 点的附近. 从末态条件有 $P_{r2} = P_2/P_c = 100/220.6 = 0.453$. 点 2 的位置是沿着等体积 v_r' 线 (容器是刚性的) 将点 1 移到表中 $P_{r2} = 0.453$ 这一点的正上方, 在这一点, $T_r \approx 1.145$; 因此, $T_2 = T_r T_{r2} \approx (1.145)(647.1) = 741.0 \text{ K}$. 这个路径就像图 4-1 中的 C 到 D.

(b) 末态温度是 741K.

(c) 对于理想气体来说, 等体积过程, $T_2 = T_1 (P_2/P_1) = (1300)(100/200) = 650 \text{ K}$.

(d) 通过在表 A5 中进行线性内插, $T_2 = 700 + [(0.0300 - 0.0283)/(0.0314 - 0.0283)](50) \approx 730 \text{ K}$.

4.37^D 将 3000psia, 1900°F 的水蒸气在一个刚性的容器里冷却, 直到压强为 1500psia. 如果水蒸气的临界参数是 $P_c = 3200 \text{ psia}$, $T_c = 1165^\circ\text{R}$. (a) 在 Z 图中画出该过程的曲线, 清楚地表明初态(1)和末态(2); (b) 用 Z 图计算末态的温度(°F); (c) 用理想气体的方程计算末态的温度(°F); (d) 如果初态水蒸气的比体积是 $0.4630 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, 根据水蒸气表, 末

态的温度是多少(°F)?

解 (a)从初始条件有, $P_{r1} = P_1/P_c = 3000/3200 = 0.938$, $T_{r1} = T_1/T_c = (1900 + 460)/1165 =$

2.03. 起始点在图 4-1 中 C 点的附近. 从末态条件有 $P_{r2} = P_2/P_c = 1500/3200 = 0.47$. 点 2 的位置是沿着等体积 v'_r 线(容器是刚性的)将点 1 移到图中 $P_r = 0.47$ 这一点的正上方, 在这一点, $T_r \approx 1.15$; 因此, $T_2 = T_{r2} T_c \approx (1.15)(1165) = 1340^\circ\text{R} = 880^\circ\text{F}$. 这个路径就像图 4-1 中的 C 到 D.

(b)末态温度是 880°F .

(c)对于理想气体来说, 等体积过程, $T_2 = T_1(P_2/P_1) = (2360)(1500/3000) = 1180^\circ\text{R} = 720^\circ\text{F}$.

(d)通过在表 A3 中进行线性内插, $T_2 = 800 + [(0.463 - 0.435)/(0.490 - 0.435)](100) \approx 850^\circ\text{F}$.

- 4.38^D 水蒸气初始状态为 90bar, 700K, 将其在一个刚性的容器中加热, 直到它的压强比初始压强增加一倍. 水蒸气的临界值为 220.6bar 和 647.1K. (a)用图 E3 计算末态的温度(K); (b)在 Z 图中画出该过程的曲线, 清楚地表明初态(1)和末态(2); (c)如果理想气体定律在这里适用, 末态的温度值(K)是什么?

解 (a)初始的简约压强是, $P_{r1} = P_1/P_c = 90/220.6 = 0.408$, 初始的简约温度是 $T_{r1} = T_1/T_c =$

$700/647.1 = 1.082$. 在 Z 图中给出的点在图 4-1 中 A 点的附近. 在一个刚性容器中加热意味着沿等体积 v'_r 线(容器是刚性的)将 A 点移到表中 $P_{r2} = P_2/P_c = 180/220.6 = 0.816$ 点的正上方. 在这个区域里, 表很难读到精确的值, 但是可能 $1.95 \leq T_{r2} \leq 2$, 因此 $T_2 = T_{r2} T_c = (1.975 \pm 0.025)(647.1) = (1278 \pm 16)\text{K}$. 当 T_2 有很大的变化的时候, T_r 只有很小的变化.

(b)和(a)中描述的一样, 这个路径从图 4-1 中 A 点开始, 大体上与路径 DC 平行, 终点在 $P_r = 0.816$ 的正上方.

(c)因为是一个理想气体的等体积过程, 所以 $T_2 = T_1(P_2/P_1) = (700)(2) = 1400\text{K}$.

- 4.39^D 水蒸气初始状态为 120psia, 600°F, 将其在一个刚性的容器中加热, 直到它的压强比初始压强增加一倍. 水蒸气的临界值为 $P_c = 3200\text{psia}$ 和 $T_c = 1165^\circ\text{R}$. (a)用图 E3 计算终点的温度(°F); (b)在 Z 图中画出该过程的曲线, 清楚地表明初态(1)和末态(2); (c)如果理想气体定律在这里适用, 末态的温度值(°F)是什么?

解 (a)初始的简约压强是, $P_{r1} = P_1/P_c = 1200/3200 = 0.375$, 初始的简约温度是 $T_{r1} = T_1/T_c = (600 + 460)/1165 = 0.910$. 在 Z 图中给出的点在图 4-1 中 A 点的附近. 在一个刚性容器中加热意味着沿等体积 v'_r 线(容器是刚性的)将 A 点移到表中 $P_{r2} = P_2/P_c = 2400/3200 = 0.750$ 点的正上方. 在末态 $1.55 \leq T_{r2} \leq 1.60$, 因此 $T_2 = T_{r2} T_c = (1.575 \pm 0.025)(1165) = (1835 \pm 30)^\circ\text{R} = (1375 \pm 30)^\circ\text{F}$. 当 T_2 有很大的变化的时候, T_r 只有很小的变化.

(b)和(a)中描述的一样, 这个路径从图 4-1 中 A 点开始, 大体上与路径 DC 平行, 终点在 $P_r = 0.750$ 的正上方.

(c)因为是一个理想气体的等体积过程, 所以 $T_2 = T_1(P_2/P_1) = (1060)(2) = 2120^\circ\text{R} = 1600^\circ\text{F}$.

- 4.40^D 水蒸气初始状态为 100bar, 800K, 将其经过一个等温膨胀过程直到体积为初始体积的 2 倍. (a)如果理想气体方程适用, 最终的压强值是多少(bar)? (b)用图 E3 计算最终的压强值; (c)在 Z 图中画出该过程的曲线, 清楚地表明初态(1)和末态(2).

解 (a) $P_2 = P_1(V_1/V_2) = 100(1/2) = 50\text{bar}$

(b)在初始条件下, $P_{r1} = P_1/P_c = 100/220.6 = 0.453$, $T_{r1} = T_1/T_c = 800/647.1 = 1.236$. 在表中的这一点, $v'_{r1} \approx 2.55$. 如果体积加倍, 则简约体积也加倍: $v'_{r2} = 2v'_{r1} = 5.10$. 现在可以把点确定在 Z 图中的 $T_{r2} = T_{r1} = 1.236$ (等温), $v'_{r2} = 5.10$ 处; 此时, $P_{r2} \approx 0.225$. 因此

$$P_2 = P_{r2} P_c = (0.225)(220.6) = 49.6\text{bar}$$

(c)在 Z-图中画出的过程曲线和图 4-1 中 B→A 的路径很接近.

- 4.41^D 水蒸气初始状态为 1500psia, 1000°F, 将其经过一个等温膨胀过程直到体积为初始体积的 2 倍. (a)如果理想气体方程适用, 最终的压强值是多少(pisa)? (b)用图 E3 计算最终的压强值; (c)在 Z 图中画出该过程的曲线, 清楚地标明初态(1)和末态(2).

解 (a) $P_2 = P_1(V_1/V_2) = (1500)(1/2) = 750\text{psia}$

(b)在初始条件下, $P_{r1} = P_1/P_c = 1500/3200 = 0.469$, $T_{r1} = T_1/T_c = (1000 + 460)/1165 = 1.25$. 在图

中的这一点, $v'_{r1} \approx 2.50$, 如果体积加倍, 则简约体积也加倍: $v'_{r2} = 2v'_{r1} = 5.00$. 现在可以把点确定在 Z 图中的 $T_{r2} = T_{r1} = 1$ (等温), $v'_{r2} = 5.00$; 此时, $P_{r2} \approx 0.275$, 因此 $P_2 = P_r P_c = (0.275)(3200) = 880 \text{ psia}$.

(c) 在 Z 图中画出的过程曲线和图 4-1 中 $B \rightarrow A$ 的路径很接近.

- 4.42^D 水蒸气初始状态为 200bar, 700K, 将其经过一个等温膨胀过程直到 100bar. (a) 如果理想气体方程适用, 最终的比体积值是多少 (m^3/kg)? (b) 用图 E3 计算最终的比体积值 (m^3/kg).

解 (a) $v_{id} = R_u T / MP = (0.08314)(700) / (18.02)(100) = 0.0323 \text{ m}^3/\text{kg}$

(b) 在初始条件下,

$$P_{r1} = P_1 / P_c = 200 / 220.6 = 0.907, \quad T_{r1} = T_1 / T_c = 700 / 647.1 = 1.08$$

现在沿着等温线 $T_r = 1.08$ 从 $P_r = 0.907$ 的垂直线开始平移到 $P_r = P_2 / P_c = 100 / 220.6 = 0.453$; 在这一点, $Z_2 \approx 0.872$, $v_2 = Z v_{id} = (0.872)(0.0323) = 0.0282 \text{ m}^3/\text{kg}$.

- 4.43^D 水蒸气初始状态为 2880 psia, 820°F, 将其经过一个等温膨胀过程直到 1440 psia. (a) 如果理想气体方程适用, 最终的比体积是多少 (ft^3/lb_m)? (b) 用图 E3 计算最终的比体积 (ft^3/lb_m).

解 (a) $v_{id} = R_u T / MP = (1545)(1280) / (1440 \times 144) = 0.529 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$

(b) 在初始条件下,

$$P_{r1} = P_1 / P_c = 0.90, \quad T_{r1} = T_1 / T_c = 1280 / 1165 = 1.10$$

现在沿着等温线 $T_r = 1.10$, $P_r = 0.90$ 的垂直线开始平移到 $P_r = P_2 / P_c = 1440 / 3200 = 0.45$; 在这点 $Z_2 = 0.883$, $v_2 = Z v_{id} = (0.883)(0.529) = 0.467 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$.

- 4.44^D 干饱和蒸汽初始状态为 615K 时, 将其经过一个等压膨胀过程直到体积为初始体积的 2 倍. 最终的温度值是多少 (K)? (a) 如果气体是理想气体; (b) 用图 E3 计算得到的值是多少?

解 (a) $T_2 = 2T_1 = 1230 \text{ K}$

(b) 在初始条件下, $T_{r1} = T_1 / T_c = 615 / 647.1 = 0.95$. 物理状态是干饱和的, 所以初始点是 $T_r = 0.95$ 这条线和饱和气体曲线的交点; 在这一点, $v'_{r1} \approx 0.735$, $Z \approx 0.57$. 垂直向上移动 (因为压强是常数), $v'_{r2} = 2v'_{r1} = 2(0.735) = 1.47$. 这出现在 $Z_2 \approx 0.87$ 或者 $T_{r2} \approx 1.24$. 所以, $T_2 = T_{r2} T_c = (1.24)(647.1) = 802 \text{ K}$.

另一种方法是 $T_2 = (Z_1 / Z_2)(2T_1) = (0.57 / 0.87)(1230) = 806 \text{ K}$.

- 4.45^D 干的饱和蒸汽初始状态为 650°F, 将其经过一个等压膨胀过程直到体积为初始体积的 2 倍. 最终的温度值是多少 (°F)? (a) 如果气体是理想气体; (b) 用图 E3 计算得到的值是多少?

解 (a) $T_2 = 2T_1 = 2(1110) = 2220 \text{ }^\circ\text{R} = 1760 \text{ }^\circ\text{F}$

(b) 在初始条件下, $T_{r1} = 1110 / 1164.8 = 0.953$.

物理状态是干饱和的, 所以初始点是 $T_r = 0.953$ 这条线和饱和气体曲线的交点; 在这一点, $v'_{r1} \approx 0.73$, $Z \approx 0.56$. 垂直向上移动 (因为压强是常数), $v'_{r2} = 2v'_{r1} = 2(0.73) = 1.46$. 这出现在 $Z_2 \approx 0.87$ 或者 $T_{r2} \approx 1.24$. 所以, $T_2 = T_{r2} T_c = (1.24)(1164.8) = 1444 \text{ }^\circ\text{R} = 984 \text{ }^\circ\text{F}$.

另一种方法是 $T_2 = (Z_1 / Z_2)(2T_1) = (0.57 / 0.87)(2220) = 1430 \text{ }^\circ\text{R} = 970 \text{ }^\circ\text{F}$.

- 4.46 理想气体的比体积等于水蒸气处在其临界压强的一半, 临界温度的两倍的状况下的比体积的多少倍?

解 因为 $P_r = 1/2$, $T_r = 2$, 图 E3 给出了 $Z = v_2 / v_{id} = 0.986$.

- 4.47^D 在 10bar, 500K 的状态下, 水蒸气以速度 $v = 50 \text{ m/s}$ 流过一个直径 50mm 的管子. 计算质量流量 (kg/s). (a) 假设是理想气体; (b) 用 Z 图.

解 (a) 连续方程给出

$$m_{id} = \rho_{id} v A = \frac{MP}{R_u T} v A = \frac{(18.016)(10)}{(0.08314)(500)} (50) \left[\pi \frac{(0.050)^2}{4} \right] = 0.425 \text{ kg/s}$$

(b) 在 $P_r = P/P_c = 10/220.6 = 0.0453$, $T_r = T/T_c = 500/647.1 = 0.773$ 处, 图 E1 给出了 $Z \approx 0.969$. 所以 $m_c = m_d/Z = 0.425/0.969 = 0.438 \text{ kg/s}$.

- 4.48^D 在 150 pisa, 400°F 的状态下, 水蒸气以速度 $v = 100 \text{ ft/s}$ 流过一个直径一英尺的管子. 计算质量流量 (lb_m/s), (a) 假设是理想气体; (b) 用 Z 图.

解 (a) 连续性方程给出

$$m_d = \rho_d v A = \frac{MP}{R_u T} v A = \frac{(18.016)(150 \times 144)}{(1545)(859.7)} (100) \left[\pi \frac{(1/12)^2}{4} \right] = 0.160 \text{ lb}_m/\text{s}$$

(b) 在 $P_r = P/P_c = 150/3206 = 0.0468$, $T_r = T/T_c = 859.7/1165.1 = 0.7379$ 处, 图 E1 给出了 $Z \approx 0.962$. 所以 $m_c = m_d/Z = 0.160/0.962 = 0.166 \text{ lb}_m/\text{s}$.

- 4.49^D 在涉及到湿空气混合物 (第 9 章) 的题里, 比湿度 $\omega = (\text{水物质质量})/(\text{干空气的质量})$ 是一个非常重要的参数. 比如在计算流量等问题中, 理想气体方程用混合气体的平均分子量. 在 $0 < T_{db} < 50^\circ\text{C}$, $0 < \omega < 0.05$ 的范围内, 这里 T_{db} 代表混合物干球热力学温度或平衡热力学温度, 真实气体的偏离将对结果有怎样的影响? 假设湿空气的压强为 1 bar.

解 这里从一般的归一化的压缩系数图来研究这个题. 对于湿空气混合物, 我们需要混合物的临界压强和临界温度. 文献里没有这些数据, 可像求分子量一样, 通过加权平均对其作粗略的猜测 (题 2.185).

$$P_{c,\text{mix}} = x_a P_{c,a} + x_w P_{c,w}, \quad T_{c,\text{mix}} = x_a T_{c,a} + x_w T_{c,w} \quad (1)$$

这里 x_a 和 x_w 分别表示空气和水的摩尔比率分数. 通过定义,

$$\omega = \frac{m_w}{m_a} = \frac{x_w M_w}{x_a M_a} = \frac{x_w}{1.608 x_a} \quad \text{或者} \quad x_w = 1.608 \omega x_a$$

因为 ω 很小, 所以有 $x_a \approx 1$, $x_w \approx 1.608 \omega$. 将这些近似值代入式 (1), 再加上从表 D1 里得到的空气和水的临界值, 给出低湿度的方程为

$$P_{c,\text{mix}} = (37.7 + 356\omega) \text{ bar}, \quad T_{c,\text{mix}} = (132.6 + 1042\omega) \text{ K} \quad (2)$$

现在用 Z 图. 在 1 bar, 300 K 状态下的绝干空气 ($\omega = 0$), 有: $P_r = P/P_c = 1/37.7 = 0.0265$, $T_r = T/T_c = 300/132.6 = 2.26$; 图 E3 给出了 $0.98 \leq Z \leq 1$. 取 $\omega = 0.05$, 状态为 1 bar, 300 K 的湿空气, $P_r = P/P_c = 1/[37.7 + 356(0.05)] = 0.018$, $T_r = T/T_c = 300/[132.6 + 1042(0.05)] = 1.624$; 图 E3 给出了 $0.98 \leq Z \leq 1$, 所以由于真实气体效应而出现的变化可忽略.

- 4.50^D 在 $32 < T_{db} < 100^\circ\text{F}$, $0 < \omega < 0.05$ 的范围内, 湿空气的压强为 14.696 pisa, 重解题 4.49.

解 在 USCS 单位制里, 题 4.49 里的公式 (2) 为

$$P_{c,\text{mix}} = (547 + 5146\omega) \text{ pisa}, \quad T_{c,\text{mix}} = (238.7 + 1873\omega) ^\circ\text{R}$$

所以对于在 14.696 pisa, 526 °R 状态下的绝干的空气 ($\omega = 0$), 有: $P_r = 0.0269$, $T_r = 2.2023$; 图 E3 给出了 $0.98 \leq Z \leq 1$. 取 $\omega = 0.05$, 状态为 14.696 pisa, 526 °R 的湿空气, 有 $P_r = 0.0183$, $T_r = 1.581$; 图 E3 给出了 $0.98 \leq Z \leq 1$, 所以由于真实气体效应而出现的变化可忽略.

- 4.51^D 用 Z 图, 简约压强的计算可用实际压强除以临界压强. 因此, 空气在大气压强 (1 bar) 下, $P_r = P/P_c = 1/37.7 = 0.0265$. 类似的, 对于水, $P_r = P/P_c = 1/220.6 = 0.0045$. 在 Z 图中, 当 $P_r \rightarrow 0$ 时, $Z \rightarrow 1$; 即在压强为零的极限下, 所有的曲线都会聚在 $Z = 1$ 处 (理想气体). 因为水的 P_r 比空气的 P_r 要小, 在空气里加入水蒸气将使混合物更加完美, 然而热力学里却说得到相反的结果. 哪个结论是正确的?

解 我们必须认识到要在 Z 图中确定一个点, 需要热力学中的独立不变量. 如果说真实温度是 300 K, 空气的简约温度是 $300/132.6 = 2.26$. 而对水来说则是 $300/647.1 = 0.46$. 在 $T_r = 2.26$ 时的压缩系数比在 $T_r = 0.46$ 时更接近 1, 所以通过减小简约压强使 Z 值有较小的增加比通过降低简约温度使 Z 值有很大增加意义更大.

临界点

- 4.52 (a) 定义临界温度. (b) 在可压缩真实流体的 $P-v$ 示意图上画出临界等温线. (c) 在临界点需用怎样的数学条件?

解 (a) 临界温度是—种物质能同时以气态液态并存时的最高温度。

(b) 见图 4-2。

$$(c) \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_{T=T_c} = 0, \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2} \right)_{T=T_c} < 0, \quad \left(\frac{\partial^3 P}{\partial v^3} \right)_{T=T_c} < 0$$

根据前两个条件, 临界等温线有一个转折点——在该点切线是水平的——这一点是临界点, 第三个条件确保在临界点附近当体积增加的时候压强减小。

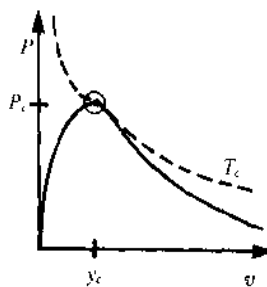


图 4-2

- 4.53 在临界点(选择一答案): (a) 饱和液体饱和蒸气同时存在; (b) 符合理想气体定律; (c) 固体, 液体, 气体处于平衡状态; (d) 只有固体和蒸气存在。

解 选择(a) [(c) 定义了三相点]。

- 4.54 符合理想气体状态方程 $Pv = RT$ 的气体的临界参数是什么?

$$\text{解} \quad \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = RT \frac{d}{dv} \left(\frac{1}{v} \right) = -\frac{RT}{v^2}$$

只有在绝对零度时上式才等于零, 故结论是理想气体没有临界参数。

- 4.55 符合状态方程 $P(v-b) = RT$ 的气体的临界参数是什么?

$$\text{解} \quad \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = RT \frac{d}{dv} \left(\frac{1}{v-b} \right) = -\frac{RT}{(v-b)^2}$$

只有在绝对零度时上式才等于零, 故结论是这个状态方程不适用于临界现象。

- 4.56 计算符合范德瓦耳斯方程 $(P + a/v^2)(v-b) = RT$ 的气体的临界参数。这里 a, b 是确定的常数。

解 根据题 4.52(c) 中的前两个条件和范德瓦耳斯方程确定用 a, b 表示的临界参数, 将范德瓦耳斯方程对 v 求两次导:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v} - \frac{2a}{v^3} \right)(v-b) + \left(P + \frac{a}{v^2} \right)(1) = 0$$

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2} - \frac{6a}{v^4} \right)(v-b) + 2 \left(\frac{\partial P}{\partial v} - \frac{2a}{v^3} \right) = 0$$

代入临界值, 得到

$$P_c = \frac{a}{v_c^2} - \frac{2ab}{v_c^3}$$

$$v_c = 3b$$

这样, $P_c = a/27b^2$, 从范德瓦耳斯方程, 得

$$T_c = \frac{1}{R} \left(P_c + \frac{a}{v_c^2} \right) (v_c - b) = \frac{8a}{27bR}$$

- 4.57 证明范德瓦耳斯方程满足题 4.52(c) 中的第三个条件。

解 将方程再次对 v 求微分:

$$\left(\frac{\partial^3 P}{\partial v^3} - \frac{24a}{v^5} \right)(v-b) + 3 \left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2} + \frac{6a}{v^4} \right) = 0$$

在临界点, 得到

$$\left(\frac{\partial^3 P}{\partial v^3} \right) = -\frac{a}{81b^5} < 0$$

- 4.58 从范德瓦耳斯状态方程得到的临界点的压缩系数是什么?

$$\text{解} \quad Z_c = \frac{R_c v_c}{RT_c} = \frac{(a/27b^2)(3b)}{R(8a/27bR)} = \frac{3}{8} = 0.375$$

- 4.59 从迭特里奇(Dieterici)方程 $P e^{a/v^2} (v-b) = RT$ ($a, b > 0$), 解题 4.56。

解 设 $T = T_c$, 对 v 求两次导, 并消去指数得

$$\frac{\partial P}{\partial v} (v-b) + P \left\{ 1 - \frac{a}{RT_c v^2} (v-b) \right\} = 0$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}(v-b) + \frac{\partial P}{\partial v} \left[2 - \frac{a}{RT_c v^2}(v-b) \right] + \frac{Pa}{RT_c v^2} \left\{ 1 - \frac{2b}{v} \right\} = 0$$

从题 4.52(c) 中的前两个条件可得到 $v = v_c$, 括号里的两个表达式必须为零, 这样 $v_c = 2b$, $T_c = a/4bR$, 所以从迭特里奇方程, 得

$$P_c = \frac{a}{4b^2} e^{-2}$$

4.60 用迭特里奇方程解题 4.57.

解 让 $T = T_c$, 对方程再次求导, 估计在 $v = v_c = 2b$ 时,

$$\left(\frac{\partial^3 P}{\partial v^3} \right)_c (v_c - b) + 0 + 0 + 0 + 0 + \frac{Pa}{RT_c} \left(-\frac{2}{v_c^3} + \frac{6b}{v_c^4} \right) = 0$$

从这个公式求得

$$\left(\frac{\partial^3 P}{\partial v^3} \right)_c = -\frac{ae^{-2}}{8b^3} < 0$$

4.61 用迭特里奇方程解题 4.58.

$$\text{解} \quad Z_c = \frac{P_c v_c}{RT_c} = \frac{(ae^{-2}/4b^2)(2b)}{R(a/4bR)} = 2e^{-2} = 0.27067$$

4.62 将范德瓦耳斯方程(题 4.56)表示成压缩系数的三阶方程.

解 将 $v = (RT/P)Z$ 代入并化简, 得到

$$Z^3 - \left(1 + \frac{bP}{RT} \right) Z^2 + \frac{aP}{R^2 T^2} Z + \frac{abP^2}{R^3 T^3} = 0$$

4.63 重解题 4.62, 将系数用 P_r, T_r 来表示.

解 将 $P = P_r P_c = (a/27b^2)P_r$, $T = T_r T_c = (8a/27bR)T_r$ 代入, (见题 4.56) 得到

$$Z^3 - [1 + (1/8)(P_r/T_r)]Z^2 + (27/64)(P_r/T_r^2)Z + (27/512)(P_r^2/T_r^3) = 0$$

4.64 将下列瑞德里奇-库恩(Redlich-Kwong)方程 I 表示成压缩系数的三阶方程,

$$\left[P + \frac{a}{v(v+b)} \right] (v-b) = RT$$

这里 $a, b > 0$.

解 将 $v = (RT/P)Z$ 代入并与之相乘, 得到

$$Z^3 - Z^2 + (\alpha - \beta - \beta^2)Z - \alpha\beta = 0$$

这里 $\alpha = aP/RT$, $\beta = bP/RT$.

4.65 用瑞德里奇-库恩方程 II

$$\left[P + \frac{a/\sqrt{T}}{v(v+b)} \right] (v-b) = RT$$

计算临界体积。

解 沿临界等温线 $a/\sqrt{T} = a'$, 瑞德里奇-库恩方程 II 和 I 二者形式一致. 在临界温度这一点求微分, 得

$$\left[\frac{\partial P}{\partial v} - \frac{a'(2v-b)}{v^2(v+b)^2} \right] (v-b) + \left[P + \frac{a'}{v(v+b)} \right] (1) = 0$$

或者

$$\frac{\partial P}{\partial v}(v-b) + P - a' \frac{v^2 - 2bv - b^2}{(v^2 + bv)^2} = 0 \quad (1)$$

再次求导, 得

$$\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}(v-b) + 2 \frac{\partial P}{\partial v} + \frac{2a'}{(v^2 + bv)^3} \{ v^3 - 3bv^2 - 3b^2v - b^3 \} = 0 \quad (2)$$

题 4.52(c) 的条件要求在 (2) 式中括号里的式子当 $v = v_c$ 的时候为零. 解三阶方程得 $v_c = (4^{1/3} + 2^{1/2} + 1)b \approx 3.8473b$.

4.66 通过瑞德里奇-库恩方程(题 4.65)证明 $Z_c = 1/3$.

解 从题 4.65 的式 (1), 得

$$\frac{P_c v_c}{a'} = \frac{v_c^3 - 2bv_c^2 - b^2 v_c}{v_c^2 (v_c + b)^2} = \frac{b}{v_c^2}$$

在上一步,用了 v_c 的三阶方程. 现在,从瑞德里奇-库恩方程,得

$$\frac{RT_c}{a'} = \left[\frac{P_c}{a'} + \frac{1}{v_c (v_c + b)} \right] (v_c - b)$$

因此

$$\frac{1}{Z_c} = \frac{RT_c/a'}{P_c v_c/a'} = \left[\frac{1}{v_c} + \frac{v_c}{b(v_c + b)} \right] (v_c - b) = \frac{v_c^2 - b^2}{b(v_c^2 + b - v_c)} = 3$$

这儿又利用了 v_c 的三阶方程.

- 4.67 将下列彭克-罗宾孙(Pen-Robinson)方程表示成压缩系数的三阶方程,

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2 - \beta^2}$$

这里 $a, b > 0, \beta = (1 + \sqrt{2})b$.

解 将 v 用 $(RT/P)Z$ 代入化简,得到

$$Z^3 - \left(\frac{bP}{RT} + 1 \right) Z^2 + \left(\frac{aP}{R^2 T^2} - \frac{\beta^2 P^2}{R^2 T^2} \right) Z - \left(\frac{abP}{R^3 T^3} - \frac{b\beta^2 P^3}{R^3 T^3} - \frac{\beta^2 P^2}{R^2 T^2} \right) = 0$$

- 4.68 计算下列状态方程的临界参数:

$$\left(P + \frac{aT^{-n}}{v^2} \right) (v-b) = RT$$

解 定义 $a' = aT_c^{-n}$, 我们可以看到沿临界等温线, 上述状态方程和范德瓦耳斯方程(题 4.56)是一致的. 因此, 从题 4.56 可以得到 $v_c = 3b$.

$$T_c = \frac{8a'}{27bR} = \frac{8aT_c^{-n}}{27bR} \quad \text{或者} \quad T_c = \left(\frac{8a}{27bR} \right)^{1/(n+1)}$$

$$P_c = \frac{a'}{27b^2} = \frac{R}{8b} T_c = \frac{R}{8b} \left(\frac{8a}{27bR} \right)^{1/(n+1)}$$

- 4.69 求题 4.68 中的气体的 Z_c .

解 3/8(根据题 4.58).

- 4.70 证明在简约坐标中范德瓦耳斯方程表示为 $(P_r + 3/v_r^2)(3v_r - 1) = 8T_r$.

解 从题 4.56, $P = P_c P_r = (a/27b^2) P_r$, $v = v_c v_r = 3bv_r$, $T = T_c T_r = (8a/27bR) T_r$. 将这些代入范德瓦耳斯方程就得到所需要的方程.

麦克斯韦关系

- 4.71 推导麦克斯韦关系 $(\partial T / \partial v)_s = -(\partial P / \partial s)_v$.

解 回忆一下微积分可知道, 当且仅当相应的条件

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}$$

成立时, 表达式 $M(x, y)dx + N(x, y)dy$ 是一个全微分 ($= dF(x, y)$). 给定的麦克斯韦关系是 Tds 方程 $du = Tds - Pd v$ 的(见题 2.324)相应条件.

- 4.72 推导麦克斯韦关系 $(\partial T / \partial P)_s = -(\partial v / \partial s)_P$.

解 这正是 Tds 方程 $dh = Tds + vdP$ 的(见题 2.324)相应条件.

- 4.73 证明麦克斯韦关系 $(\partial v / \partial T)_P = -(\partial s / \partial P)_T$.

解 对吉布斯方程 $g = u - Ts + Pv$ 求导, 可以得到 $dg = dv - Tds + Pd v + vdP = sdT + vdP$ (题 4.71 里的 Tds 方程已经被用来简化这个方程了). 麦克斯韦关系对 dg 是适用的.

- 4.74 (a) 证明麦克斯韦关系 $(\partial s / \partial v)_T = (\partial P / \partial T)_v$; (b) 根据气体初始和最终的温度以及它的比体积推导从状态 1 到状态 2 内能变化的表达式. 这种气体的状态方程是 $(P-c)v = RT$, 它的比热由 $c_v = a + bT$ 给出. 这里 a, b, c 是常数.

解 (a) 考虑方程 $f = u - Ts$. 求导, $df = (du - Tds) - sdT = -Pd v - sdT$; 相应的条件给出了麦

克斯韦关系.

(b) 如果 $u=u(v, T)$, 则 $du=(\partial u/\partial v)_T dv+(\partial u/\partial T)_v dT=c_v dT+(\partial u/\partial v)_T dv$. 但是, 从 $Tds=du+Pdv$, $T(\partial s/\partial v)_T=(\partial u/\partial v)_T+P$; (a) 因此隐含了 $T(\partial P/\partial T)_v=P-(\partial u/\partial v)_T$.

这样

$$du=c_v dT+\left[T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v-P\right]dv$$

对于本题里的气体, 式(1)变成 $du=(a+bT)dT+cdv$. 积分得

$$u_2-u_1=a(T_2-T_1)+(b/2)(T_2^2-T_1^2)+c(v_2-v_1)$$

4.75 用循环关系证明 $(\partial s/\partial v)_T=(\partial P/\partial T)_v$ [题 4.74].

解 从微积分可以知道如果三个变量通过一个函数式相联系, 也就是说 $\phi(x, y, z)=0$, 则 $d\phi=\phi_x dx+\phi_y dy+\phi_z dz$, 这就给出了

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z=-\frac{\phi_y}{\phi_x}, \quad \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x=-\frac{\phi_z}{\phi_y}, \quad \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y=-\frac{\phi_x}{\phi_z}$$

这三个方程的结果就是

$$\left(\frac{\partial x}{\partial y}\right)_z \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)_x \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)_y = -1$$

将式(1)应用于变量 T, v, s , 并且用题 4.71 中的麦克斯韦关系, 有

$$\left(\frac{\partial P}{\partial s}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v = 1$$

但是 $\left(\frac{\partial P}{\partial s}\right)_v \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v$ 和 $(\partial v/\partial s)_T = 1/(\partial s/\partial v)_T$. 因此

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T$$

此题阐明了麦克斯韦关系的循环联系.

4.76 推导三项关系 $(\partial s/\partial P)_T = -(\partial v/\partial T)_s - (\partial v/\partial s)_T (\partial s/\partial T)_P$.

解 如果 ϕ 是 x, y 的函数, 有 $d\phi/dx=(\partial\phi/\partial x)_y+(\partial\phi/\partial y)_x(dy/dx)$. 这样, 对于 $v=v(T, s)$, 就可以得到 $(\partial v/\partial T)_P=(\partial v/\partial T)_s+(\partial v/\partial s)_T(\partial s/\partial T)_P$. 这个式子和题 4.73 的结果一起可以得到需要的结果.

4.77 推导三项的关系 $(\partial s/\partial P)_v = -(\partial v/\partial T)_P - (\partial s/\partial v)_P (\partial v/\partial P)_T$.

解 如果 $v=v(T, P)$, 那么 $(\partial v/\partial T)_s=(\partial v/\partial T)_P+(\partial v/\partial P)_T(\partial P/\partial T)_s$; 或者用题 4.71(反过来)和题 4.72(反过来),

$$-(\partial s/\partial P)_v=(\partial v/\partial T)_P+(\partial v/\partial P)_T(\partial s/\partial v)_P.$$

4.78 证明

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_s = \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T - \frac{T}{c_v} \left(\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v\right)^2$$

解 从 $P=P(v, T)$ 可以得到

$$\left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_s = \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T + \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s = \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T - \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial P}{\partial s}\right)_v = \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T - \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_v$$

这里第二步用到了题 4.71. 但是, 当体积是一个常数时, $Tds=du=c_v dT$, 或者 $(\partial T/\partial s)_v = \frac{T}{c_v}$, 这样完成了证明.

4.79 证明, 对于过热蒸汽, $T-s$ 图表中的等体线比等压线斜率更大.

解 Tds 方程给出了(题 2.324) $ds=(c_v/T)dT+(P/T)dv$, 因此 $(\partial T/\partial s)_v=T/c_v$, $ds=(c_p/T)dT-(R/P)dP$, 因此 $(\partial T/\partial s)_P=T/c_p$. 但是 $c_v < c_p$.

4.80 在致冷剂 R12 的 $(\log P)-h$ 图中, 在过热蒸汽的区域里等熵线几乎是直线. 证明在这个区域里等熵过程可以近似的用下列关系来表示: $Pv=\text{常数}$.

解 如果等熵线是直线, 那么

$$\left(\frac{\partial(\log P)}{\partial h}\right)_s = \text{常数} \quad \text{或者} \quad \frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial h}\right)_s = \text{常数}$$

但是, Tds 方程 $dh = Tds + vdp$ 给出在一个等熵过程中,

$$\left(\frac{\partial P}{\partial h}\right)_s = \frac{1}{v}$$

因此, $1/Pv$ 常数, 或者 Pv 常数.

克劳修斯-克拉珀龙方程

- 4.81 用吉布斯方程, $g = u - Ts + Pv$, 推导克劳修斯-克拉珀龙方程, $dP/dT = h_{fg}/T v_{fg}$, 此即汽压曲线的斜率.

解 根据题 4.73, 当 P, T 有微小的变化时, $\Delta g = v \Delta P - s \Delta T$. 将这个运用于蒸汽压曲线(图 4-3)任何一边的相邻两点: $g_{12} = v_g \Delta P - s_g \Delta T$, $g_{34} = v_f \Delta P - s_f \Delta T$; 所以 $g_{12} - g_{34} = v_{fg} \Delta P - s_{fg} \Delta T$, 或者

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{s_{fg}}{v_{fg}} = \frac{h_{fg}/T}{v_{fg}}$$

当 $\Delta T \rightarrow 0$ 时, 得到克劳修斯-克拉珀龙方程.

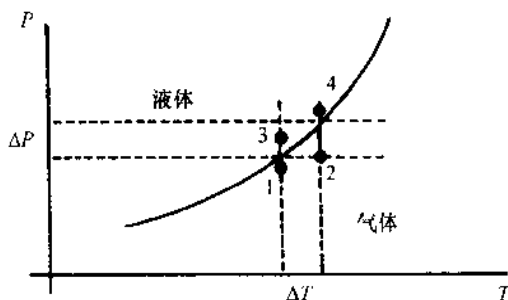


图 4-3

- 4.82 证明在临界点汽化焓是零。

解 根据克劳修斯-克拉珀龙方程, $h_{fg} = T v_{fg} (dP/dT)$. 当接近临界点的时候, dP/dT 是一定的 (是正数), 而 $v_{fg} = v_g - v_f \rightarrow 0$ (饱和液体和饱和气体曲线相交). 这样, $h_{fg} \rightarrow 0$.

- 4.83 对克劳修斯-克拉珀龙方程积分, 可以得到一个用温度作为变量的关于纯液体的蒸汽压随温度变化的表达式. 在这个推导里哪三个假设是必要的?

解 所作的第一个近似是, 在远离临界点的地方, $v_{fg} \approx v_g$; 所以克劳修斯-克拉珀龙方程变为 $dP/dT \approx h_{fg}/T v_g$. 下一个近似是气体为理想气体, 给出 $v_g = RT/P$, $dP/dT \approx P h_{fg}/RT^2$, 或者 $dP/P = (h_{fg}/R)(dT/T^2)$. 如果作第三个近似, 那么这个式子的积分会很容易. 汽化焓与温度无关: 可以得到 $\int dP/P = (h_{fg}/R) \int dT/T^2$, 或者 $\ln P = A + B/T$.

- 4.84^b 在 20°C 时, 一些表格给出了水的蒸汽压为 2338.87 Pa; 在 40°C 时, 是 7383.83 Pa. 在 30°C 时, 对克劳修斯-克拉珀龙方程积分会得到怎样的蒸汽压值?

解 用已知数据去估计式子 $\ln P = A + B/T$ (温度用 K) 中的常量, 可以得到 $B = -5276.8 \text{ K}$, $A = 25.75776$. 因此, 在 30°C = 303.15 K 时, $\ln P = 25.75776 - (5276.8/303.15) = 8.35120$, 或者 $P = 4325.24 \text{ Pa}$. 最后得到的数据没有太大的意义. (文献中给出的 $P = 4246.21 \text{ Pa}$)

- 4.85^b 在 60°F 时, 一些关于水蒸气的表格给出了水的蒸汽压为 0.25611 psia; 在 100°F 时, 是 0.94924 psia. 80°F 时, 对克劳修斯-克拉珀龙方程积分会得到怎样的 P 值?

解 用已知数据去估计式子 $\ln P = A + B/T$ (温度用 °R) 中的常量, 可以得到 $B = -9526.3 \text{ °R}$, $A = 16.96859$. 因此, 在 80°F = 539.69 °R, $\ln P = 16.96859 - (9526.3/539.69) = -0.68258$, $P = 0.50518 \text{ psia}$. 最后得到的数据没有太大的意义. (文献中给出的 $P = 0.50683 \text{ psia}$).

- 4.86^b 根据题 4.84, 在怎样的温度(°C)下蒸汽压是 500 Pa?

解 解方程

$$\ln 500 = 25.75776 - (5276.8/T)$$

得

$$T = 306.07\text{K} = 32.92^\circ\text{C}$$

4.87^D 根据题 4.85 里的数据,在怎样的温度($^\circ\text{F}$)下蒸汽压是 0.36292psia?

解 解方程

$$\ln 0.36292 = 16.96858 - (9526.3/T)$$

得

$$T = 529.76^\circ\text{R} = 70.07^\circ\text{F}$$

4.88 如果一种流体的蒸汽压能用方程 $\ln P = A + B/T$ 表示,根据两组数据 (P_1, T_1) 、 (P_2, T_2) 求出系数 A 、 B .

解 同时解两个方程 $\ln P_1 = A + B/T_1$ 和 $\ln P_2 = A + B/T_2$, 可得到

$$A = \frac{T_2 \ln P_2 - T_1 \ln P_1}{T_2 - T_1}, \quad B = \frac{T_1 T_2}{T_2 - T_1} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

4.89 如果一种流体的蒸汽压能用方程 $\ln P = A + B/T$ 表示,证明在蒸汽压曲线上的任意三点的温度和压强可用下面的式子来表示:

$$\ln \left(\frac{P_3}{P_1} \right) = \frac{T_2(T_1 - T_3)}{T_3(T_2 - T_1)} \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

解 从三个线性方程消去 A 和 B

$$1A + (1/T_1)B = \ln P_1$$

$$1A + (1/T_2)B = \ln P_2$$

$$1A + (1/T_3)B = \ln P_3$$

可以得到[用第二行和第三行减去第一行]

$$\begin{aligned} 0 &= \begin{vmatrix} 1 & 1/T_1 & \ln P_1 \\ 1 & 1/T_2 & \ln P_2 \\ 1 & 1/T_3 & \ln P_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1/T_1 & \ln P_1 \\ 0 & 1/T_2 - 1/T_1 & \ln(P_2/P_1) \\ 0 & 1/T_3 - 1/T_1 & \ln(P_3/P_1) \end{vmatrix} \\ &= \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \ln \frac{P_3}{P_1} - \left(\frac{1}{T_3} - \frac{1}{T_1} \right) \ln \frac{P_2}{P_1} \end{aligned}$$

再将它转换即得所证方程.

4.90^D 用题 4.89 中的公式去检验题 4.84 的结果.

解 $\ln(P_3/2338.87)$

$$\begin{aligned} &= [(313.15)(293.15 - 303.15)/(303.15)(313.15 - 293.15)] \ln(7383.83/2338.87) \\ &= 0.59377 \end{aligned}$$

所以

$$P_3/2338.87 = 1.81780, \quad P_3 = 4235.24\text{Pa}$$

4.91^D 用题 4.89 中的公式去检验题 4.85 的结果.

解 $\ln(P_3/0.25611)$

$$\begin{aligned} &= [(559.69)(519.69 - 539.69)/(539.69)(559.69 - 519.69)] \ln(0.25611/0.94924) \\ &= 0.67929 \end{aligned}$$

所以

$$P_3/0.25611 = 1.97248, \quad P_3 = 0.50517\text{psia.}$$

4.92^D 用题 4.89 中的公式去检验题 4.86 的结果.

解 线性方程是

$$\ln \frac{5000}{2338.87} = \frac{(313.15)(293.15 - T_3)}{T_3(313.15 - 293.15)} \ln \frac{2338.87}{7383.83}$$

解方程求 T_3 , 得到 $T_3 = 306.07\text{K} = 32.92^\circ\text{C}$.

4.93^D 用题 4.89 中的公式去检验题 4.86 的结果.

解 线性方程是

$$\ln \frac{0.36292}{0.25611} = \frac{(559.69)(519.69 - T_3)}{T_3(559.69 - 519.69)} \ln \frac{0.25611}{0.94924}$$

解方程求 T_3 , 得到 $T_3 = 529.77^\circ\text{R} = 70.08^\circ\text{F}$.

4.94^D 叙述安特英(Antoine)蒸汽压方程. 解释从蒸汽压的数据怎样确定它的系数?

解 这个方程的形式是 $\ln P = a + b/(T+c)$. 很明显, 如果定义一个可调温度 $\theta \equiv T+c$, 安特英方程简约成一个两个常量的克劳修斯-克拉珀龙形式的方程. 这样, 由题 4.89, 有

$$\ln \frac{P_3}{P_1} = \frac{\theta_2(\theta_3 - \theta_1)}{\theta_3(\theta_2 - \theta_1)} \ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{(T_2+c)(T_1-T_3)}{(T_3+c)(T_2-T_1)} \ln \frac{P_1}{P_2}$$

解方程得到

$$c = \frac{T_2(T_3-T_1)\ln(P_2/P_1) - T_1(T_2-T_1)\ln(P_3/P_1)}{(T_2-T_1)\ln(P_3/P_1) - (T_3-T_1)\ln(P_2/P_1)} \quad (1)$$

c 已知, 安特英方程 $\ln P = a + b/\theta$, 适用于题 4.84~4.93. 注意到由于三组数据次序是任意的, 公式 (1) 的下标 1, 2, 3 可进行任何转换.

4.95 用安特英方程去拟合下面的数据:

$T/^\circ\text{C}$	10	25	40
P/bar	0.012281	0.031691	0.073814

解 任意将三组数据的下标标为 1, 2, 3; 把温度的单位转换成 K; 代入题 4.94 中的式 (1); 结果是 $c = -35.64110\text{K}$. 现在可以用题 4.88 的公式里的两点的数 $(P, \theta) = (P, t + 237.5089)$ 去求得 a 和 b .

4.96 表 4-7 的头两行数据表示的是水的一些蒸汽压. 用 40, 80, 120°F 的数据代入安特英蒸汽压方程, 求出 c , (为了更精确) 用中间的数据求 a 和 b . 验证方程, 用它计算表中列出的每一温度下的饱和蒸汽压.

解 解的过程和题 4.95 一样——但是温度的单位换成 $^\circ\text{R}$ ——可以得到 $c = -76.603^\circ\text{R}$. 现在用题 4.88 里两点的数 $(0.25651, 443.087)$ 和 $(0.95063, 483.087)$ 去求得 $a = 14.46023$, $b = -7010.01^\circ\text{R}$. 因此安特英方程是 $\ln P = 14.46023 - 7010.01/(T - 76.603)$, P 的单位是 psia, T 的单位是 $^\circ\text{R}$. 计算表中列出的温度的压强值, 得到表 4-7 的第三行.

表 4-7

$T/^\circ\text{F}$	40	60	80	100	120
$P/\text{psia}(\text{ref})$	0.12182	0.25651	0.50912	0.95063	1.69495
$P/\text{psia}(\text{calc})$	0.12142	0.25650	0.50797	0.95063	1.69255
$\Delta P/P(\%)$	0.33	0	0.23	0.00	0.01

4.97^D 参见题 4.84. 在 30°C 时, 蒸汽压的增加率 dP/dT 是多少 (Pa/K)?

解 从克劳修斯-克拉珀龙方程,

$$\frac{dP}{dT} = \frac{-BP}{T^2} = \frac{(5276.8\text{K})(4325.24\text{Pa})}{(303.15\text{K})^2} = 243.18\text{Pa/K}$$

4.98^D 根据题 4.85. 在 80°F 时, 蒸汽压的变化率 dP/dT (psia/ $^\circ\text{R}$) 的计算值是多少?

解 根据克劳修斯-克拉珀龙方程

$$\frac{dP}{dT} = \frac{-BP}{T^2} = \frac{(9526.3^\circ\text{R})(0.50518\text{psia})}{(539.69^\circ\text{R})^2} = 0.01652\text{psia}/^\circ\text{R}$$

4.99^D 根据题 4.84. 当蒸汽压以 250Pa/K 的速率增加时, 计算此时的温度 ($^\circ\text{C}$).

解 根据克劳修斯-克拉珀龙方程

$$\ln\left(\frac{dP}{dT}\right) = \ln\left(\frac{-BP}{T^2}\right) = \ln(-B) + \ln P - 2\ln T = \ln(-B) + A + \frac{B}{T} - 2\ln T$$

这样, 设 $x = 1/T$, 我们需要解这样一个方程 $Bx + 2 = C$. 这个方程能通过牛顿法用图解法来解. 最后的结果是 $T \approx 303.70\text{K} \approx 30.55^\circ\text{C}$.

4.100^D 参见题 4.85. 若蒸汽压以 $0.01500\text{psia}/^\circ\text{R}$ 的变化率增加, 计算对应的温度 ($^\circ\text{F}$).

解 解此题与解题 4.99 类似: 只有 B 和 C 的值不一样. 最后的结果是

$$T = 536.37^\circ\text{R} = 76.68^\circ\text{F}$$

4.101 参见题 4.96. 在 80°F 时, 蒸汽压的变化率 dP/dT (psia/ $^\circ\text{R}$) 的估计值是多少?

解 根据安特英方程, 有

$$\frac{dP}{dT} = \frac{-bP}{(T+c)^2} = \frac{(7010.01^\circ\text{R})(0.50797\text{psia})}{(463.087^\circ\text{R})^2} = 0.01660\text{psia}/^\circ\text{R}$$

4.102^D 在 305K 温度下, 根据克劳修斯-克拉珀龙方程算出水的汽化焓是多少 (kJ/kg)? 参照表 A2.

解 方程是 $h_{fg} = T(dP/dT)v_{fg}$. 假设 v_f , v_g 和 P 都与温度成线性关系, 那么

$$dP/dT \approx \Delta P/\Delta T = (0.06221 - 0.03531)/(310 - 300) = 2.69 \times 10^{-3} \text{bar/K} = 0.269 \text{kPa/K}$$

$$v_g = (22.93 + 39.13)/2 = 31.03 \text{m}^3/\text{kg}; v_f = (0.001003 + 0.001007)/2 = 0.001005 \text{m}^3/\text{kg}$$

因此,

$$h_{fg} = (305)(0.269)(931.03 - 0.00) = 2546 \text{kJ/kg}$$

(表格里的值是 $2559 - 133 = 2426 \text{kJ/kg}$; 我们使用的线性化的数据产生了误差.)

4.103^D 在 45°F 温度下, 根据克劳修斯-克拉珀龙方程算出的水的汽化焓是多少 (Btu/lb_m)? 参照表 A1.

解 方程是 $h_{fg} = T(dP/dT)v_{fg}$. 假设 v_f , v_g 和 P 都与温度成线性关系, 那么 $dP/dT \approx \Delta P/\Delta T = (0.1780 - 0.1216)/(50 - 40) = 5.64010^{-3} \text{psia}/^\circ\text{F} = 0.812 \text{lb}_f/\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{R}$; $T = 459.7 + 45 = 504.7^\circ\text{R}$; $v_g - v_f = (1705 + 2446)/2 - (0.01602 + 0.01602)/2 \approx 2076 - 0 = 2076 \text{ft}^3/\text{lb}_m$. 因此, $h_{fg} = (504.7)(0.812)(2076) = 850779 \text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m = 1093 \text{Btu/lb}_m$. (从这张表里得到的值是 $(1079 + 1083)/2 - (18.1 + 8.0)/2 = 1072 \text{Btu/lb}_m$ 我们使用的线性化的数据产生了误差.)

4.104^D 参见题 4.83 和 4.84. 在 30°C 温度下, 预测得到的水的汽化焓是多少 (kJ/kg)?

解 根据题 4.83, 假设 h_{fg} 与温度无关, 它由下式给出

$$h_{fg} = RT^2 \left(\frac{1}{P} \frac{dP}{dT} \right) = R(-B) = \frac{8.314 \text{kJ/kmol} \cdot \text{K}}{18.016 \text{kg/kmol}} (5276.8 \text{K}) = 2435 \text{kJ/kg}$$

4.105^D 参见题 4.83 和 4.85. 在 80°F 温度下, 预测得到的水的汽化焓是多少 (Btu/lb_m)?

解 如题 4.104,

$$h_{fg} = R(-B) = \frac{(1547/778) \text{Btu/lb}_m \text{mole} \cdot ^\circ\text{R}}{18.016 \text{lb}_m/\text{lb}_m \text{mole}} (9526.3^\circ\text{R}) = 1050 \text{Btu/lb}_m$$

4.106 参照题 4.94 和 4.96. 在 80°F 温度下, 预测得到的水的汽化焓是多少 (Btu/lb_m)?

解 根据克劳修斯-克拉珀龙方程,

$$h_{fg} = RT^2 \frac{d}{dT} (\ln P) = \frac{R(-b)}{(1+c/T)^2} = \frac{(1.99 \text{Btu/lb}_m \text{mole} \cdot ^\circ\text{R})(7010^\circ\text{R})}{[1 - (76.603/539.69)]^2} \cdot \frac{1}{18.016 \text{lb}_m/\text{lb}_m \text{mole}} = 1055 \text{Btu/lb}_m$$

4.107 假设汽化焓随着温度呈线性关系减小, 重解题 4.83.

解 同前面一样, $dP/P = (h_{fg}/R)(dT/T^2)$. 令 $h_{fg} = A - BT$, 积分得到 $\ln P = \alpha + (\beta/T) + (\gamma \ln T)$, 在这里 α, β, γ 都是常数.

4.108^D 蒸汽表给出了下面这些蒸汽压的数据: (10°C , 122727.94Pa); (25°C , 3168.74Pa); (40°C , 7381.27Pa). 用题 4.107 里的公式拟合这些数据.

解 由三组数据, 将其中的温度改成开尔文, 得到三个等式

$$7.11309 = \alpha + 3.53170 \times 10^{-3} \beta + 5.64598 \gamma$$

$$8.06109 = \alpha + 3.35402 \times 10^{-3} \beta + 5.69760 \gamma$$

$$8.90670 = \alpha + 3.19336 \times 10^{-3} \beta + 5.74668 \gamma$$

解得(用消去法)

$$\alpha = 58.03928, \quad \beta = -6732.4 \text{K}, \quad \gamma = -4.80862$$

4.109^D 用题 4.108 里得到的三常数方程去计算 $0(5)50^\circ\text{C}$ 下的饱和蒸汽压并且和原始数据进行比较.

解 见 表 4-8.

表 4-8

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
T, K	273.15	278.15	283.15	288.15	293.15	298.15	303.15	308.15	313.15	318.15	323.15
$\ln P$	6.41556	6.77138	7.11312	7.44153	7.75732	8.06112	8.35358	8.63527	8.90671	9.16851	9.42084
$P_{\text{sat}}, \text{Pa}$	611.28	872.52	1227.97	1705.36	2338.6	3168.8	4245.4	5626.7	7381.3	9590.3	12342.9
$P_{\text{ref}}, \text{Pa}$	611.21	872.47	1227.94	1705.32	2338.5	3168.8	4245.2	5626.5	7381.3	9589.8	12344.8
$\Delta P/P(\%)$	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0.02	0	0.01	0.02

- 4.110^D 水蒸气的表给出了下面这些蒸汽压的数据: (0.25611psia, 60°F) (0.50683 psia, 80°F) (0.94924psia, 100°F)

解 由三组数据, 将其中的温度改成朗氏度($^{\circ}\text{R}$), 得到三个等式

$$-1.36215 = \alpha + 1.92422 \times 10^{-5} \beta + 6.25323 \gamma$$

$$-0.67958 = \alpha + 1.85292 \times 10^{-5} \beta + 6.29099 \gamma$$

$$-0.05209 = \alpha + 1.78670 \times 10^{-5} \beta + 6.32728 \gamma$$

解得(用消去法)

$$\alpha = 52.5800, \quad \beta = -12160\text{R}, \quad \gamma = -4.88446$$

- 4.111^D 用题 4.110 里得到的三常数公式去计算 40(10)100°F 下的饱和蒸汽压并且和原始数据进行比较.

解 见 表 4-9.

表 4-9

$t, ^\circ\text{F}$	40	50	60	70	80	90	100
$T, ^\circ\text{R}$	499.69	509.69	519.69	529.69	539.69	549.69	559.69
$\ln P$	-2.10717	-1.72640	-1.35222	-1.01358	-0.67956	-0.35935	-0.24784
$P_{\text{calc}}, \text{psia}$	0.12158	0.17792	0.2561	0.3629	0.5068	0.6981	0.9492
$P_{\text{ref}}, \text{psia}$	0.12163	0.17796	0.2561	0.3629	0.5068	0.6981	0.9492
$\Delta P/P(\%)$	-0.04	-0.02	0	0	0	0	0

- 4.112^D 根据克劳修斯-克拉珀龙方程和题 4.108 的蒸汽压方程去预测 0(10)50°C 温度下蒸汽汽化焓的值(kJ/kg).

解

$$h_{fg} = RT^2 \frac{d}{dT} (\ln P) - RT^2 \left(\frac{-\beta}{T^2} + \frac{\gamma}{T} \right) = R(\gamma T - \beta)$$

用 $R=0.46150\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, 得到:

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50
T/K	273.15	283.15	293.15	303.15	313.15	323.15
$R(\gamma T - \beta)/(\text{kJ/kg})$	2500.8	2478.6	2456.5	2434.3	2412.1	2389.9

- 4.113^D 根据克劳修斯-克拉珀龙方程和题 4.110 的蒸汽压方程去预测 40, 70 和 100°F 温度下蒸汽汽化焓的值(kJ/kg).

解 和题 4.112 一样, $h_{fg} = R(\gamma T - \beta)$, 这时 $R=0.1102\text{Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$ 结果如下所示:

$t, ^\circ\text{F}$	40	70	100
$T, ^\circ\text{R}$	499.69	529.69	559.69
$R(\gamma T - \beta)/(\text{Btu/lbm})$	1071.3	1055.2	1039.0

4.114 某些俄国的表提供了饱和空气冷凝(露点)的蒸汽压值如下:

T/K	70	75	80
P/bar	0.1939	0.4242	0.8272

从题 4.83 的两常数公式估计在下列温度下冷凝压强的值:(i)50K;(ii)60K.

解 最简单的解法是利用题 4.89. 用下标 1 和 2 分别表示 70K 和 80K, 可以得到

$$(i) \quad \ln P_{50\text{K}} - \ln 0.1939 = \frac{80(70-50)}{50(80-70)} (\ln 0.1939 - \ln 0.8272)$$

$$\ln P_{50\text{K}} = 0.0019 \text{ bar}$$

$$P_{50\text{K}} = 0.0019 \text{ bar}$$

$$(ii) \quad \ln P_{60\text{K}} - \ln 0.1939 = \frac{80(70-60)}{60(80-70)} (\ln 0.1939 - \ln 0.8272)$$

$$\ln P_{60\text{K}} = -3.5741$$

$$P_{60\text{K}} = 0.0280 \text{ bar}$$

4.115 用题 4.114 里的三常数公式重解 4.114.

解 从题 4.94 式(1),

$$C = \frac{(80)(75-70)\ln(0.8272/0.1939) - (75)(80-70)\ln(0.4242/0.1939)}{(80-70)\ln(0.4242/0.1939) - (75-70)\ln(0.8272/0.1939)} = -11.936 \text{ K}$$

化简的数据如下:

θ/K	58.064	63.064	68.064
P/bar	0.1939	0.4242	0.8278

在(i) $\theta=58.064\text{K}$ 和(ii) $\theta=63.064\text{K}$ 的状态下,用这些数据计算得到的压强就和题 4.114 里的结果一样是(i)0.00109 bar;(ii)0.02486 bar.

4.116 用题 4.107 里的三常数公式重解 4.107.

解 用三组数据测定三个常数 α, β, γ , 就得到这样的方程式

$$\ln P = 31.75722 - (1118.89/T) - (4.09874 \ln T); \text{ 这样得到 (i) } P = 0.00129 \text{ bar, (ii) } P = 0.2541 \text{ bar.}$$

4.117 考虑一个普适的, n 个常数的蒸汽压公式

$$\ln P = a_0 + a_1 f_1(T) + a_2 f_2(T) + \cdots + a_{n-1} f_{n-1}(T) \quad (1)$$

$f_i(T)$ 是已知函数, 用 n 组数据 (T_j, P_j) , 证明(1)式可写成下列形式:

$$\ln(P/P_0) = \sum_{j=1}^n \lambda_j(T) \ln(P_j/P_0). \text{ 其中 } \sum_{j=1}^n \lambda_j(T) \equiv 1 \quad (2)$$

这里 $\lambda_j(T)$ 也是已知函数, P_0 是一个任意的参考压强.

解 代入 n 组数据得出 n 个线性方程, 消去(1)式中的常数 $a_0, a_1, \cdots, a_{n-1}$, 得到

$$\begin{vmatrix} 1 & f_1(T) & f_2(T) & \cdots & f_{n-1}(T) & \ln P \\ 1 & f_1(T_1) & f_2(T_1) & \cdots & f_{n-1}(T_1) & \ln P_1 \\ 1 & f_1(T_2) & f_2(T_2) & \cdots & f_{n-1}(T_2) & \ln P_2 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 1 & f_1(T_n) & f_2(T_n) & \cdots & f_{n-1}(T_n) & \ln P_n \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

或者, 用最后一列的代数余子式 $A_{1,n+1}$,

$$A_{1,n+1} \ln P + A_{2,n+1} \ln P_1 + A_{3,n+1} \ln P_2 + \cdots + A_{n,n+1} \ln P_n = 0 \quad (4)$$

假设 $A_{1,n+1}$ (仅仅包括一些特殊温度) 是非零的, (4)式可以写成下列形式

$$\ln P = \sum_{j=1}^n \lambda_j \ln P_j \quad \text{和} \quad \lambda_j = -\frac{A_{j+1,n+1}}{A_{1,n+1}} \quad (5)$$

所有的这些都表明 $\sum \lambda_j = 1$ [从(5)式两边同时减去 $\ln P_0$ 将得到(2)式]. 把行列式(3)的最后一列用 1 代替; 行列式仍然为零, 因为两列是相同的. 因此, 按最后一列的代数余子式展开, $A_{1,n+1} + A_{2,n+1} + A_{3,n+1} + \cdots + A_{n,n+1} = 0$, 这个式子等价于 $\sum \lambda_j = 1$. 注意该式的性质

$$\lambda_j(T_k) = \begin{cases} 0, & j \neq k \\ 1, & j = k \end{cases}$$

- 4.118 把题 4.117 的结果用于公式 $\ln P = \alpha + (\beta/T) + (\gamma \ln T)$.

解
$$\lambda_1 = \frac{T_1(T_2 - T_3)T \ln(T/T_2) - T_1 T_3(T_2 - T) \ln(T_3/T_2)}{T_3(T_1 - T_2)T \ln(T_3/T_1) - T_2(T_1 - T_3)T \ln(T_2/T_1)}$$

$$\lambda_2 = \frac{T_2 T_3(T_1 - T)T \ln(T_2/T_1) - T_2(T_1 - T_3)T \ln(T/T_1)}{T_3(T_1 - T_2)T \ln(T_3/T_1) - T_2(T_1 - T_3)T \ln(T_2/T_1)}$$

$$\lambda_3 = 1 - \lambda_1 - \lambda_2$$

焦耳-汤姆孙系数

- 4.119 导出焦耳-汤姆孙系数的表达式,其定义为 $\mu \equiv (\partial T / \partial P)_h$.

解 因为 $dh = c_p dT + [v - T(\partial v / \partial T)_P] dP$ [见题 4.176(a)], 又因为 $dh = 0$,

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_h = \frac{1}{c_p} \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P - v \right]$$

- 4.120 在何种过程中焦耳-汤姆孙系数是很重要的?

解 流体的节流过程是等焓的——见题 5.14.

- 4.121 证明焦耳-汤姆孙系数可以表示为 $\mu = (T^2 / c_p) [\partial(v/T) / \partial T]_P$.

解 因为, $T^2 [d(v/T) dT] = T(dv/dT) - v$,

$$\frac{1}{c_p} T^2 \left(\frac{\partial(v/T)}{\partial T} \right)_P = \frac{1}{c_p} \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P - v \right] = \mu$$

- 4.122 用压缩系数 Z 表示焦耳-汤姆孙系数 μ .

解 将 $v/T = (R/P)Z$ 代入题 4.121 的公式中:

$$\mu = \frac{RT^2}{Pc_p} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P - \frac{vT}{c_p} \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial T} \right)_P$$

- 4.123 一种气体被节流. 求沿着转换曲线的压强的微分方程.

解 转换曲线被定义为 $\mu = 0$, 或者 $(\partial v / \partial T)_P = v/T$. 循环公式给出了

$$(\partial P / \partial T)_v (\partial v / \partial T)_P (\partial v / \partial P)_T = -1 \quad \text{或者} \quad (\partial v / \partial T)_P = -(\partial P / \partial T)_v (\partial v / \partial P)_T$$

因此, 根据 $\mu = 0$ 有

$$v \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T + T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v = 0$$

- 4.124 理想气体的焦耳-汤姆孙系数是多少?

解 如果 $Z = 1$, 那么根据题 4.122, $\mu = 0$.

- 4.125 焦耳-汤姆孙系数一定为零的一种气体的最普适的状态方程是什么?

解 根据题 4.121, $\mu = 0$ 意味着 $v/T = \phi(P)$, 这里的 ϕ 表示的是一任意函数. 类似的, $P = \psi(\rho T)$. (对理想气体, $\psi(x) = Rx$.)

- 4.126 一理想气体被节流. 会出现怎样的温度变化?

解 根据题 4.124, $0 = \mu = \Delta T / \Delta P$. 这样温度变化是零.

- 4.127 求范德瓦耳斯气体的 μ .

解 如果 $(P + a/v^2)(v - b) = RT$. 把 P 看成常数, 对 v 求导,

$$\left(0 - \frac{2a}{v^3} dv \right) (v - b) + \left(P + \frac{a}{v^2} \right) dv = R dT$$

或者
$$\frac{dv}{dT} = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = R \left[-\frac{2a}{v^3} (v - b) + \left(P + \frac{a}{v^2} \right) \right]^{-1} = \frac{Rv^3(v - b)}{RTv^3 - 2a(v - b)^2}$$

因此
$$\mu = \frac{1}{c_p} \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P - v \right] = \frac{1}{c_p} \frac{2av(v - b)^2 - bRTv^3}{RTv^3 - 2a(v - b)^2}$$

- 4.128 范德瓦耳斯气体被节流, 找出转换曲线的方程.

解 根据题 4.127, 要求的方程是 $2av(v - b)^2 - bRTv^3$, 或者

$$T = T_c = \frac{2a}{Rb} \left(\frac{v-b}{v} \right)^2$$

4.129 求迭特里奇气体的 μ (题 4.59).

解 把压强看成常数, 对状态方程求导:

$$e^{a/RT} \left[\frac{-a}{RT^2 v^2} (Tdv + vdT) \right] (v-b) + e^{a/RT} dv = \frac{R}{P} dT$$

或者

$$\frac{dv}{dT} = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \frac{\frac{v-b}{T} + \frac{a(v-b)}{RT^2 v}}{-\frac{a(v-b)}{RT^2 v^2}} = \frac{v(v-b)}{T} \frac{RTv+a}{RTv^2-a(v-b)}$$

因此

$$\mu = \frac{1}{c_p} \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P - v \right] = \frac{v}{c_p} \frac{2a(v-b) - bRTv}{RTv^2 - a(v-b)}$$

4.130 对于迭特里奇气体, 证明焦耳-汤姆孙转换温度是 $T_c = (2a/Rb)[(v-b)/v]$.

解 把题 4.129 里的 μ 看成零即得.

4.131 证明对于密度为零的范德瓦耳斯气体, 其简约的转换温度是 $27/4$.

解 将题 4.56 里的临界常数代入题 4.128 的方程, 可以得到

$$T_c = \frac{27}{4} \left(1 - \frac{1}{3v_c} \right)^2$$

结果显而易见.

- 4.132^D 自行车车胎里的空气经过压缩, 压强可以从 2bar 增加到 7bar; 开始时抽气筒里的空气温度是 25°C, 压强为 1bar. (a) 假设压缩过程是绝热的, 当抽气筒里的空气压强增加到 5bar 时, 温度将达到多少? (b) 按照步骤 (a) 把气体经阀门压至车胎, 假设在阀门里没有热量散失, 当压强是 4bar 时, 轮胎里的气体温度是升高还是降低?

解 (a) 假设压缩是可逆的 (因此, 等熵),

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(k-1)/k} \quad (k=1.4)$$

$$T_2 = 298(50.2857) = 471.97\text{K} \approx 200^\circ\text{C}$$

(b) 假设在阀门中进行的是一个等焓节流过程. 在入口处, $P_r = P_1/P_c = 5/37.7 = 0.133$, $T_r = T_1/T_c = 492/133 = 3.70$. 根据米勒 (D. G. Miller) 在 Ind. Eng. Chem., Fundts, 9, 585 (1970) 里提出的最佳三常数拟合法, 转换曲线在简约坐标里表示为 $P_r = 24.21 - 18.54/T_r - 0.825T_r^2$; 因此, 当 $T_r = 3.70$ 时, $P_r = 7.91$ (图 4-4 上的 A 点). 现在, 当 $P_r = 0.133$ 时, 节流过程实际的点像 B 点的一样, 位于 $\mu = (\partial T/\partial P)_h > 0$ 的区域. 因为必然有 $\Delta P < 0$; 因此 $\Delta T < 0$, 空气的温度将降低.

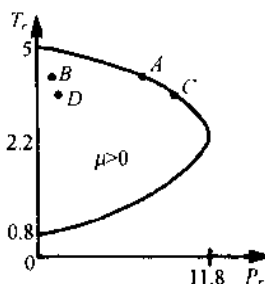


图 4-4

- 4.133^D 自行车车胎里的空气经过压缩, 压强可以从 35lb_f/ft² 增加到 110lb_f/ft²; 开始的时候抽气筒里的空气是 15psia, 60°F. (a) 假设压缩过程是绝热的, 如果抽气筒里的气体被压缩到 75psia, 温度是多少 (°F)? (b) 按照步骤 (a) 把气体压进轮胎. 假设在阀门里没有热量散失, 当胎内的压强是 60psia 时, 轮胎里的气体温度是升高还是降低?

解 (a) 假设压缩是可逆的 (因此, 等熵), $T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(k-1)/k} \quad (k=1.4)$; 其中 $T_2 = 520(50.2857) = 824^\circ\text{R} = 364^\circ\text{F}$.

(b) 假设在阀门中进行的是一个等焓节流过程. 在入口处, $P_r = P_1/P_c = 75/547 = 0.137$, $T_r = T_1/T_c = 824/239 = 3.45$. 根据米勒在 Ind. Eng. Chem. Fundts, 9, 585 (1970) 里提出的三常数拟合法, 转换曲线在简约坐标里表示为 $P_r = 24.21 - 18.54/T_r - 0.825T_r^2$; 因此, 当 $T_r = 3.45$ 时, $P_r = 9.02$ (图 4-4 上的 C 点). 现在, 当 $P_r = 0.137$ 时, 节流过程实际的状态像 D 点的位置一样, 在

$$\mu = (\partial T/\partial P)_h > 0$$

的区域. 因为必然有 $\Delta P < 0$; 因此 $\Delta T < 0$, 空气的温度将降低.

4.134 根据题 4.132 和题 4.133 里的反转方程证明图 4-4 中给出的最大压强 (简约值).

解

$$0 = dP_r/dT_r = (18.54/T_r^2) - 1.65T_r, \quad T_r = 2.24$$

在这个温度下 $P_r = 11.79$.

- 4.135** 计算两个简约的转换温度,并把它列成表, $T_{d'}$ 和 $T_{d''}$ 分别表示简约的压强 $P_r = 0(0.5)3(1)11, 11.79$ 时的温度,用米勒(Miller)关系 $P_r = 24.21 - (18.54/T_r) - 0.85T_r^2$ 计算.

解 我们可以用作曲线图(如图 4-4)代替解三次解析方程,读取所描绘的垂直线的交点,这为三次方程的三重解提供了一好的初值.最后结果见表格 4-10.

表 4-10

P_r	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4
$T_{d'}$	0.782	0.800	0.818	0.838	0.859	0.880	0.903	0.953
$T_{d''}$	4.984	4.916	4.847	4.777	4.706	4.633	4.550	4.401
P_r	5	6	7	8	9	10	11	11.79
$T_{d'}$	1.01	1.08	1.16	1.25	1.35	1.50	1.73	2.24
$T_{d''}$	4.23	4.06	3.88	3.68	3.45	3.18	2.86	2.24

- 4.136** 把空气视为纯净物质,其临界参数值 $P_c = 37.7\text{bar}$, $T_c = 132.6\text{K}$,用米勒方程 $P_r = 24.21 - 18.54/T_r - 0.825T_r^2$ 去计算在 0,50,100,150,200bar 时空气较高的转换温度 $T_U(\text{K})$,较低的转换温度 $T_L(\text{K})$.

解 见表 4-11, T_r 和 $T_{d'}$ 的计算就和题 4.135 里的一样;然后把这些值和临界温度进行比较.

表 4-11

P/bar	0	50	100	150	200	250
$P_r = P/P_c$	0.000	1.326	2.653	3.979	5.305	6.631
$T_L = T_c T_{d'}/\text{K}$	104	110	117	126	136	149
$T_U = T_c T_{d''}/\text{K}$	662	637	612	585	555	525

- 4.137** 把空气视为纯净物质($P_c = 547\text{psia}$, $T_c = 238.7^\circ\text{R}$),其反转曲线由米勒方程 $P_r = 24.21 - (18.54/T_r) - 0.825T_r^2$ 给出.计算当转换温度为 250°R 时的空气的压强.

解

$$T_r = T/T_c = 250/238.7 = 1.0473$$

$$P_r = 24.21 - (18.54/1.0473) - 0.825(1.0473)^2 = 5.61$$

因此, $P = P_r P_c = (5.61)(547) = 3069\text{psia}$.

- 4.138** 参见题 4.137. 对于计算的压强, 250°R 是较高的还是较低的转换温度?

解 当 $P_r = 5.61$ 时,米勒方程是关于 T_r 的三次方程:

$$T_r^3 - 22.54545T_r + 22.47273 = 0 \quad (1)$$

由于(1)式有一根是已知的($T_r = 1.0473$),三次方程可以降为二次方程去解.一个解这种方程的快捷方法是注意到方程 $T^3 - aT + b = 0$ 的三个根 x, y, z 必须遵守对称关系 $x + y + z = 0$ 和 $xyz = -b$. 这样,

$$x + y - \frac{b}{xy} = 0 \quad \text{或者} \quad y^2 + xy - (b/x) = 0 \quad \text{或者} \quad y = -\frac{x}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + \frac{b}{x}}$$

最后的一个简明的方程式可以根据已知的根(x)求出另一个根(y).另一有物理意义的转换温度是

$$T_r = -0.52365 + \sqrt{(0.52365)^2 + \frac{22.47273}{1.0473}} \approx 4$$

所以 $T_r = 1.0473$ 所表示的是较低的转换温度.

- 4.139^D** 在 50bar、 20°C 的状态下,打开盛有 CO_2 的气缸的阀门,让其很快地扩散到空气中去,有可能产生“干冰”(固体 CO_2)吗?

解 对于气体 $P_r = P/P_c = 50/73.8 = 0.678$, $T_r = T/T_c = 293/304 = 0.964$. 当 $T_r = 0.964$, 米

勒方程给出了 $P_r = 24.21 - (18.54/0.964) - 0.825(0.964)^2 = 4.21$, 因为 $0.678 < 4.21$, 排出的 CO_2 实际位于转换曲线内, 这样 CO_2 是被冷却. 精确数值可以通过状态方程计算得到或通过表格里的数据得到. 在 60bar, 50°C 时, μ 的文献值是 $0.88^\circ\text{C}/\text{bar}$; 所以 -49bar 时的 ΔP 将产生一个 $\Delta T = 43^\circ\text{C}$ 的冷却温度, 不足以形成固体 CO_2 .

但是可以观察到雪状物! 这就意味着用 $0.88^\circ\text{C}/\text{bar}$ 乘以 49bar 来计算冷却程度不够精确. 当 CO_2 冷却时, 系数 μ 的值增加. 这样实际冷却的程度要大于 43°C . 实际上喷管效应(这儿不考虑)也使结果发生变化.

- 4.140^D 在 750pisa, 80°F 的状态下, 打开盛有 CO_2 的气缸的阀门, 让其很快地扩散到空气中去, 有可能产生“干冰”(固体 CO_2) 吗?

解 对于气体 $P_r = P/P_c = 750/1070 = 0.701$, $T_r = T/T_c = 540/547 = 0.987$. 当 $T_r = 0.987$, 米勒方程给出了 $P_r = 24.21 - (18.54/0.987) - 0.825(0.987)^2 = 4.63$. 因为 $0.701 < 4.63$, 排出的 CO_2 实际点在转换曲线内, 这样 CO_2 就被冷却. 精确数值可以通过状态方程计算得到或通过表格里的数据得到. 使用一个文献中列出的 μ 的估计值 $0.11^\circ\text{F}/\text{bar}$, 得到 -735pisa 时的 ΔP 将使温度降低 80°F, 不足以形成固体 CO_2 . 但是可以观察到雪状物! 这就意味着用 $0.11^\circ\text{F}/\text{pisa}$ 乘以 75pisa 来计算冷却程度不够精确. 当 CO_2 冷却时, 系数 μ 的值增加. 这样实际冷却的程度要大于 80°F. 实际上喷管效应(这儿不考虑)也使结果发生变化.

- 4.141 液态氢可以作为火箭(或者是家用??)的燃料, 某些人甚至在谈论用管道在全国输送它. 一本书上引用的临界压强和临界温度分别是 12.98atm(190.8pisa) 和 33.19K (59.74°R). 在一个冷却厂里从室温开始通过焦耳-汤姆孙膨胀, 能产生液态氢吗? 为什么能或为什么不能?

解 因为通过焦耳-汤姆孙膨胀会出现冷却, 所以膨胀必然导致氢的冷却. 这样 μ 必然是正的, 所以节流的条件在图 4-3 的范围内. 因此如果使用米勒方法(题 4.132), 则 $T_r < 5$, $P_r < 11.8$. 但是 $T_r < 5$ 意味着 $T = T_r T_c < 5(33.19\text{K}) = 166\text{K}$. 室温节流是不可能的.

- 4.142 你对致冷剂 R12 感兴趣, 但是在最全的关于 R12 性质的 SI 表中你不会发现任何焦耳-汤姆孙系数或转换温度的值. 完成下面的关于 R12 的表格.

P/bar	0	50	100
T_L/K	—	—	—
T_U/K	—	—	—

临界值可以查表 D1.

解 用米勒方程 $Y = 0.825T_r^2 + (18.54/T_r) = 24.21 - P_r$.

$P_r = 0\text{bar}$; $24.21 - P_r = 24.21$. 用尝试法求解. 当 $T_r = 0.8$ 时, $Y = 0.825(0.8)^2 + (18.54/0.8) = 23.70$ ——太小了. 减小 T_r 以增加 Y , 因为 $18.54/T_r$ 的增加比 $0.825T_r^2$ 的减少快. 当 $T_r = 0.782$ 时, $Y = 0.51 + 23.71 = 24.22$ ——非常接近: $T = T_r T_c = (0.782)(385.2) = 301.2\text{K}$. 用题 4.138 的方法将很快得到另一转换温度下的 $T_r = 4.984$; 这里, 我们仍用尝试法. 当 $T_r = 5$, $0.825(5^2) + (18.54/5) = 24.33$ ——太大了. 在这个例子里, 减小 T_r 以减小 Y , 因为 $0.825T_r^2$ 的减小比 $18.54/T_r$ 的增加快. 当 $T_r = 4.984$, $Y = 20.49 + 3.72 = 24.21$; $T = T_r T_c = (4.984)(385.2) = 1920\text{K}$.

$P_r = 50\text{bar}$; $24.21 - P_r = 23.00$. 通过尝试得到 (i) $T_r = 0.828$, $Y = 0.57 + 22.41 = 22.98$, 从这可得到 $T = T_r T_c = (0.828)(385.2) = 319\text{K}$; (ii) $T_r = 4.820$, $Y = 3.85 + 19.17 = 23.02$, 从这可得到 $T = T_r T_c = (4.820)(385.2) = 1857\text{K}$.

$P_r = 100\text{bar}$; $24.21 - P_r = 21.78$. (i) 当 $T_r = 0.876$, $Y = 21.16 + 0.63 = 21.79$, 从这可得到 $T = (0.876)(385.2) = 337\text{K}$; (ii) 当 $T_r = 4.643$, $Y = 17.79 + 3.99 = 21.78$, 从这可得到 $T = (4.643)(385.2) = 1789\text{K}$.

- 4.143 扩充题 4.142 里的表让其包含最大的转换压强.

解 根据题 4.134, 压强的最大值约为 11.79; 它出现在简约温度为 2.24 的时候. 这样, 对于 R12, $P_{\max} = (11.79)(41.2) = 486\text{bar}$, 在这个压强下, $T_L = T_U = (2.24)(385.2) = 863\text{K}$.

- 4.144 参见题 4.142. 缺少 μ 的值意味着包含 R12 的节流过程不能被分析吗?

解 不是的。虽然关于 μ 的普适的工程热力学方程(题 4.119)总是有效的,但是真实温度变化的计算或者逆向轨迹的计算将需要一个状态方程。在大部分的致冷计算里,节流过程是一个高压饱和液体膨胀成二相(液态-气态)混合物的过程。焓值表等,在两相区比状态方程用得更多。见第 10 章。

- 4.145^D 10bar, 500K 蒸汽被节流到 480K; 计算焦耳-汤姆孙系数(K/bar)。

解 在给定的条件下, $h_1 = 2891.2 \text{ kJ/kg}$, 且过程是一个等焓过程。在 480K 的时候, 表 A5 中有 $h(1.5 \text{ bar}) = 2886.6 \text{ kJ/kg}$, $h(1 \text{ bar}) = 2889.0 \text{ kJ/kg}$ 。在这样一个相当低的温度($T_r = T/T_c = 0.77$)下, 焓的变化不再与压强成线性关系。虽然如此, 如果通过线性外推, 那么在 $1 + [(2891.2 - 2889.0)/(2886.6 - 2889.0)](0.5) = 0.54 \text{ bar}$ 时可得到焓值为 2891.2 kJ/kg 。因此 $\Delta T = 480 - 500 = -20 \text{ K}$ 和 $\Delta P = 0.54 - 10 = -9.46 \text{ bar}$, 给出 $\mu \approx \Delta T / \Delta P = 2.11 \text{ K/bar}$ 。

- 4.146^D 在 150psia, 1000°F, 蒸汽被节流到大气压强。(a) 温度将会出现什么样的变化? (b) 这个过程中焦耳-汤姆孙系数是多少(°F/psia)?

解 (a) 该过程是等焓过程, 所以 $h_2 = h_1 = 1531 \text{ Btu/lb}_m$ 。从表格 A3, 在 14.7psia 和 900°F 的条件下, $h = 1483 \text{ Btu/lb}_m$; 而在 14.7psia 和 1000°F 的条件下, $h = 1535 \text{ Btu/lb}_m$ 。因此, 在 14.7psia 的压强下, 1531 Btu/lb_m 的焓值对应的温度为 $900 + [(1531 - 1483)/(1535 - 1483)](1000 - 900) = 992^\circ\text{F}$ 。这样温度的变化

$$\Delta T = 992 - 1000 = -8^\circ\text{F}$$

(b) $\mu = (\partial T / \partial P)_h \approx \Delta T / \Delta P = (-8^\circ\text{F}) / [(14.7 - 150) \text{ psia}] = +0.059^\circ\text{F/psia}$ 。(注意到压强的变化无论用单位 psia 还是 psig 来表示, 其值是相同的。)

- 4.147^D 在 10bar, 1000K 的条件下, 通过节流能否使蒸汽冷却到 1bar?

解 利用表 A5, 刚开始 $h_1 = 3984 \text{ kJ/kg}$ 。在 1bar 和 950K 的条件下, $h_2 = 3876 \text{ kJ/kg}$; 当在 1bar 和 1000K 的条件下, $h_2 = 3990 \text{ kJ/kg}$ 。3984 kJ/kg 的焓值将出现在 $950 + [(3984 - 3876)/(3990 - 3876)](50) = 997.4 \text{ K}$ 的时候, 所以冷却降低的温度是 $997.4 - 1000 = -2.6 \text{ K}$ 。若所有的焓值四舍五入到 1 kJ/kg , 则结果 -2.6 K 的不确定度为 $\pm(2/114)50 = \pm 0.9 \text{ K}$ 。这样, 即使假设误差最大, 冷却仍然能进行。

- 4.148 从市场上购买的摩丝喷射罐中喷出的射流的湿度是焦耳-汤姆孙冷却的结果吗?

解 如果对罐里的物质不了解, 很难确定其结果。如果罐子里面的物质是气态的并且喷射剂是致冷剂 R12, 那么从等焓线和饱和气体曲线出现交叉点来看, 罐子里的压强大于 25bar。关于 R12 的蒸汽压的数据表明了在此压强下, 温度是 358K, 远远高于室温。由于存在湿度而罐压强不可能是 25bar, 所以应假设是压缩液体膨胀, 膨胀后仍存在湿度, 而这减少了开始存在的“湿度”。

潜热方程推导

- 4.149 推导饱和液体和饱和蒸汽的比热与等压和等温状态下比热的关系。

解 由于 $dq = Tds = cdT$ 或 $c = T(ds/dT)$ 。取 $s = f(P, T)$, 那么 $ds/dT = (\partial s/\partial T)_P + (\partial s/\partial P)_T (dP/dT)$ 和 $c = T(ds/dT) = T(\partial s/\partial T)_P + T(\partial s/\partial P)_T (dP/dT)$ 。在这个表达式中, $c_p = (dq/dT)_P = T(\partial s/\partial T)_P$; 同时, 根据麦克斯韦关系式, $(\partial s/\partial P)_T = -(\partial v/\partial T)_P$ 。这样 $c = c_p - T(\partial v/\partial T)_P (dP/dT)$ 。如果这个方程式用于饱和液体, 那可以得到 $c_f = c_{pf} - T(\partial v_f/\partial T)_P (dP/dT)_f$; 同样用于饱和蒸汽, 得到 $c_g = c_{pg} - T(\partial v_g/\partial T)_P (dP/dT)_g$ 。

- 4.150 对 100K 状态下的液态空气, $P_f = 6.6785 \text{ bar}$, $dP_f/dT = 0.4665 \text{ bar/K}$, $v_f = 1.3025 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, $dv_f/dT = 9.73 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}$, $c_{pf} = 2.119 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。沿饱和曲线比热是多少($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)?

解

$$c_f = c_{pf} - T(\partial v_f/\partial T)(dP_f/dT)$$

$$= (2.119 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) - (100 \text{ K})(9.73 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(46.65 \text{ kN/m}^2)$$

$$= 2.074 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \text{ (表中列出的值是 } 2.071 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K)}$$

- 4.151 推导一些书中所称的“第二潜热方程”或者“克劳修斯方程”。

$$c_{pg} - c_{pf} = T \frac{\partial(h_{fg}/T)}{\partial T}$$

解 让气液混合物的质量统一为气体质量 m , 将其加热, 温度变化 dT , 加热使液体蒸发掉 dm . 根据实际情况仍然处于饱和状态, 蒸汽压从 P 增加到 $P+dP$. 热量被用来 (1) 蒸发液体 (2) 加热液体和蒸汽. 因此 $dQ = dQ_1 + dQ_2 = h_{fg}dm + [(1-m)c_{pf} + mc_{pg}]dT$. 关于 ds 的相应的关系 (见题 4.71) 正是所求的方程.

普适的热力学方程

4.152 证明 $c_p = T(\partial P/\partial T)_v(\partial v/\partial T)_p$

解 参见题 4.149,

$$c = T \frac{ds}{dT} = c_p - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{dP}{dT} \right)$$

设 $ds=0$, 得到所求的结果.

4.153 证明 $c_v = -T(\partial P/\partial T)_v(\partial v/\partial T)_p$

解 由题 4.74(a) 中偏导数的循环关系及 $c = T(ds/dT)$, 可以得到

$$-T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = -T \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = +T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v - c_v$$

4.154 证明 $(\partial c_p/\partial P)_T = -T(\partial^2 v/\partial T^2)_p$

解 由于

$$c_p = T(\partial s/\partial T)_p$$

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial P} \right)_T = T \frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p = T \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial s}{\partial P} \right)_T = T \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

在这里使用了麦克斯韦方程 $(\partial s/\partial P)_T = -(\partial v/\partial T)_p$.

4.155 证明 $(\partial c_v/\partial v)_T = T(\partial^2 P/\partial T^2)_v$

解 由于

$$c_v = T(\partial s/\partial T)_v$$

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = T \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v = T \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial s}{\partial v} \right)_T = T \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v$$

在这里使用了麦克斯韦方程 $(\partial s/\partial v)_T = (\partial P/\partial T)_v$.

4.156 对于 273 到 281K (0 到 8°C) 之间的水, $v = 1 + a(T - 277)^2$, 这里 a 是一个常数. 如果温度保持不变, 证明 c_p 将随着压强的增加而减小.

解 根据题 5.154, $(\partial c_p/\partial P)_T = -T(2a) < 0$

4.157 证明 $c_p - c_v = T(\partial P/\partial T)_v(\partial v/\partial T)_p$

解 先设比熵是一个压强和温度的函数, 那么 $ds = (\partial s/\partial P)_T dP + (\partial s/\partial T)_P dT$, 而 $c_p = T(\partial s/\partial T)_P$, 并根据麦克斯韦方程, $(\partial s/\partial P)_T = -(\partial v/\partial T)_P$, 得

$$ds = \frac{c_p}{T} dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP \quad (1)$$

再设比熵是比体积和温度的函数, 那么 $ds = (\partial s/\partial v)_T dv + (\partial s/\partial T)_v dT$, 而 $c_v = T(\partial s/\partial T)_v$, 并根据麦克斯韦方程, $(\partial s/\partial v)_T = (\partial P/\partial T)_v$, 得

$$ds = \frac{c_v}{T} dT + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv \quad (2)$$

从方程 (1) (2) 中消去 ds 得到: $(c_p - c_v)dT = T[(\partial v/\partial T)_P dP + (\partial P/\partial T)_v dv]$. 令 $T = f(P, v)$, 所以 $dT = (\partial T/\partial P)_v dP + (\partial T/\partial v)_P dv$. 那么

$$(c_p - c_v) \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_v dP + (c_p - c_v) \left(\frac{\partial T}{\partial v} \right)_P dv = T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP + T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v dv \quad (3)$$

消去方程 (3) 中 dP 或 dv 的系数就得到所求的结果.

4.158 证明 $c_p > c_v$.

解 解循环方程 $(\partial P/\partial T)_v(\partial T/\partial v)_p(\partial v/\partial P)_T = -1$, 用 $(\partial v/\partial T)_P$ 表示并代入题 4.157 的方程式, 得到

$$c_p - c_v = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P^2 \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T$$

这里 T 是正数, 平方项也一定是正数, $(\partial P / \partial v)_T$ 总是负的, 所以 $c_p - c_v > 0$.

4.159 证明 $c_p - c_v = T \left[\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P + \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \right]$.

解 用题 4.152 里的方程式减去题 4.153 的方程式, 即得.

4.160 证明对于理想气体, $c_p - c_v = R$.

解 用理想气体方程计算题 4.157 中方程式的偏微分即得.

4.161 证明 (a) $(\partial v / \partial P)_T = (-ZRT/P^2) + (RT/P)(\partial Z / \partial P)_T$;

(b) $(\partial v / \partial T)_P = (RZ/P) + (RT/P)(\partial Z / \partial T)_P$.

解 因为 $v = ZRT/P$,

(a) $\left(\frac{\partial v}{\partial P} \right)_T = RT \frac{\partial}{\partial P} \left(Z \frac{1}{P} \right)$

(b) $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \frac{R}{P} \frac{\partial}{\partial T} (ZT)$

4.162 证明 (a) $(\partial P / \partial v)_T = (-ZRT/v^2) + (RT/v)(\partial Z / \partial v)_T$;

(b) $(\partial P / \partial T)_v = (RZ/v) + (RT/v)(\partial Z / \partial T)_v$.

解 由于在方程式 $Pv = ZRT$ 中, P 和 v 是对称出现的; 因此将题 4.161 结果中的 P 和 v 交换便得到所求的结果.

4.163 证明

(a) $\left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = \frac{RT^2}{v} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_v + \frac{2RT}{v} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_v$

(b) $\left(\frac{\partial c_p}{\partial P} \right)_T = -\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_P - \frac{2RT}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P$

解 (a) 根据题 4.155,

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = T \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_v = \frac{RT}{v} \frac{\partial^2}{\partial T^2} (ZT) = \frac{RT}{v} \left[\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_v T + 2 \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_v \right]$$

(b) 根据题 4.154,

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial P} \right)_T = -T \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_P = -\frac{RT}{P} \frac{\partial^2}{\partial T^2} (ZT) = -\frac{RT}{P} \left[\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial T^2} \right)_P T + 2 \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P \right]$$

4.164 证明 (a) $c_p - c_v = -T [(\partial v / \partial T)_P]^2 (\partial v / \partial P)_T$. (b) $c_p - c_v = -T [(\partial P / \partial T)_v]^2 (\partial P / \partial v)_T$.

解 (a) 根据题 4.157 的结果运用循环方程 $(\partial P / \partial T)_v (\partial T / \partial v)_P (\partial v / \partial P)_T = -1$.

(b) 根据题 4.157 的结果运用循环方程 $(\partial v / \partial T)_P (\partial T / \partial P)_v (\partial P / \partial v)_T = -1$.

4.165 证明 $(\partial P / \partial T)_v = [k / (k-1)] (\partial P / \partial T)_v$, $k \equiv c_p / c_v$.

解 利用题 4.152 和 4.157.

$$\frac{k}{k-1} = \frac{c_p}{c_p - c_v} = \frac{T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P}{T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P - \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v}$$

4.166 定义 (a) 体积膨胀系数 (或者体胀系数) β ; (b) 等温压缩系数 κ_T ; (c) 等熵压缩系数 κ_s ; (d) 热压强系数 γ .

解 (a) $\beta = (1/v) (\partial v / \partial T)_P = (1/V) (\partial V / \partial T)_P$

(b) $\kappa_T = -(1/v) (\partial v / \partial P)_T = -(1/V) (\partial V / \partial P)_T$

(c) $\kappa_s = -(1/v) (\partial v / \partial P)_s = -(1/V) (\partial V / \partial P)_s$

(d) $\gamma = (\partial P / \partial T)_v$

4.167 建立相互关系的方程; (a) $\beta = \kappa_T \gamma$; (b) $k = c_p / c_v = \kappa_T / \kappa_s$.

解 (a) 根据题 4.166, 循环方程 $(\partial v / \partial T)_P (\partial T / \partial P)_v (\partial P / \partial v)_T = -1$ 可变为

$$(\beta v) \left(\frac{1}{\gamma} \right) \left(\frac{-1}{\kappa_T v} \right) = -1$$

(b) s 一定, 根据题 4.157 里的式(1)和(2), 可得到

$$\frac{c_p}{T} dT = \beta v dP, \quad \frac{c_v}{T} dT = -\gamma dv$$

因此, 通过除法,

$$k = -\frac{\beta v}{\gamma} \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = \frac{\beta}{\gamma \kappa_T} = \frac{\kappa_P}{\kappa_T}$$

上一步用了(a)的结果.

4.168 证明对于理想气体 $\beta = \kappa_T \gamma$.

解 因为 $\ln P + \ln v = \ln T$, 那么, 取 $(d/dT)_P, (d/dP)_T, (d/dT)_v$, 可以得到

$$\beta = \frac{1}{T}, \quad \frac{1}{P} + \kappa_T = 0, \quad \frac{1}{P} \gamma = \frac{1}{T}$$

然后得到所要证明的关系式.

4.169 根据状态方程 $P(v-b) = RT$ 证明关系式 $\beta = \kappa_T \gamma$.

解 因为 $\ln P + \ln(v-b) = \ln R + \ln T$, 过程和 4.168 一样:

$$\frac{1}{v-b} (\beta v) = \frac{1}{T}, \quad \frac{1}{P} + \frac{1}{v-b} (-\kappa_T) = 0, \quad \frac{1}{P} \gamma = \frac{1}{T}$$

然后得到所要证明的关系式.

4.170 根据范德瓦耳斯状态方程 $(P + a/v^2)(v-b) = RT$ 证明关系式 $\beta = \kappa_T \gamma$.

解 将 $(d/dT)_P$ 代入状态方程

$$-\frac{2a}{v^3} (v\beta)(v-b) + (P + a/v^2)(v\beta) = R$$

用 $RT/(v-b)$ 代替 $P + a/v^2$, 解得

$$\beta = \frac{Rv^2(v-b)}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

将 $(d/dP)_T$ 代入状态方程, 得

$$\left[1 - \frac{2a}{v^3} (-v\kappa_T) \right] (v-b) + (P + a/v^2) (-v\kappa_T) = 0$$

用 $RT/(v-b)$ 代替 $P + a/v^2$, 解得

$$\kappa_T = \frac{v^2(v-b)^2}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

最后, 用 $(d/dT)_v: \gamma(v-b) = R$, 或者

$$\gamma = \frac{R}{v-b}$$

我们可以看出事实上 $\beta = \kappa_T \gamma$.

4.171 用迭特里奇状态方程证明关系式 $\beta = \kappa_T \gamma$, 状态方程可写为

$$\ln P + \frac{a}{RTv} + \ln(v-b) = \ln R + \ln T$$

解 像前面几题一样, 用 $(d/dT)_P, (d/dP)_T, (d/dT)_v$, 可以得到

$$\beta = \frac{(a + RTv)(v-b)}{T[RTv^2 - a(v-b)]}$$

$$\kappa_T = \frac{v(v-b)RT}{P[RTv^2 - a(v-b)]}$$

$$\gamma = \frac{P(a + RTv)}{RvT^2}$$

即得证.

4.172 证明 $c_p - c_v = \beta^2 T v / \kappa_T$.

解 根据题 4.164(a)和题 4.166(a)和(b),

$$c_p - c_v = -T\alpha^2\beta^2/(-\alpha\kappa_T) = T\alpha\beta^2/\kappa_T$$

- 4.173 对(a)范德瓦耳斯气体和(b)迭特里奇气体计算 $c_p - c_v$.

解 4.173 (a)根据题 4.172 和 4.170,

$$c_p - c_v = \left[\frac{Rv^2(v-b)}{RTv^3 - 2a(v-b)^2} \right]^2 (Tv) \frac{RTv^3 - 2a(v-b)^2}{v^2(v-b)^2} - \frac{R^2 Tv^4}{RTv^3 - 2a(v-b)^2}$$

(b)根据题 4.172 和 4.171,

$$\begin{aligned} c_p - c_v &= \frac{(a+RTv)^2(v-b)^2}{T^2[RTv^2 - a(v-b)]^2} (Tv) \frac{P[RTv^2 - a(v-b)]}{v(v-b)RT} \\ &= \frac{(a+RTv)^2 P(v-b)}{RT^2[RTv^2 - a(v-b)]} = \frac{(a+RTv)^2}{T[RTv^2 - a(v-b)]e^{a/RTv}} \end{aligned}$$

- 4.174 用压缩参数 Z 表示下列参数:(a)体积膨胀系数 β (b)等温压缩系数 κ_T (c)热压强系数 γ .

解 4.174 将 Z 的定义写成 $\ln P + \ln v = \ln Z + \ln R + \ln T$.

$$(a) \quad \beta = \left(\frac{\partial \ln v}{\partial T} \right)_P = \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial T} \right)_P + \frac{1}{T}$$

$$(b) \quad \kappa_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial \ln v}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{P} - \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial P} \right)_T$$

(c)用 $(d/dT)_v$, 有

$$\frac{1}{P} \gamma = \left(\frac{\partial \ln Z}{\partial T} \right)_v + \frac{1}{T} \quad \text{或者} \quad \gamma = P \left[\left(\frac{\partial \ln Z}{\partial T} \right)_v + \frac{1}{T} \right]$$

- 4.175 证明 $c_p/c_v = (\partial v/\partial P)_T (\partial P/\partial v)_s$.

解 4.175 已经在题 4.167(b)里证明过了.

- 4.176 推导

$$(a) \quad \Delta h = \int c_p dT + \int [v - T(\partial v/\partial T)_P] dP;$$

$$(b) \quad \Delta s = \int c_p dT/T - \int (\partial v/\partial T)_P dP.$$

因为等式右边仅仅含有可测量的变量,这些方程被称为“实验方程”.

解 4.176 (a) $dh = Tds + vdP$ 包含

$$\left(\frac{dh}{dT} \right)_P = T \left(\frac{ds}{dT} \right)_P + c_p \quad \text{和} \quad \left(\frac{dh}{dP} \right)_T = T \left(\frac{ds}{dP} \right)_T + v$$

但是(题 4.73) $(ds/dP)_T = -(\partial v/\partial T)_P$; 因此, $dh = c_p dT + [v - T(\partial v/\partial T)_P] dP$ 这是所求方程的微分形式.

(b)根据(a)有

$$\begin{aligned} ds &= \frac{1}{T} dh - \frac{v}{T} dP = \frac{1}{T} \left\{ c_p dT + [v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P] dP \right\} - \frac{v}{T} dP \\ &= \frac{c_p}{T} dT - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP \end{aligned}$$

这是所求方程的微分形式.

- 4.177 证明 $(\partial h/\partial P)_T = -(RT^2/P)(\partial Z/\partial T)_P$.

解 4.177 由题 4.176(a), 有

$$\left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T = v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = \frac{RZT}{P} - \frac{RT}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P = -\frac{RT^2}{P} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right)_P$$

- 4.178 求关于 Δu 的“实验方程”(题 4.176).

解 4.178 根据 $du = Tds - Pd v$, 可以得到 $(\partial u/\partial T)_v = T(\partial s/\partial T)_v = c_v$, 和(见题 4.75)

$(\partial u/\partial v)_T = T(\partial s/\partial v)_T - P = T(\partial P/\partial T)_v - P$. 因此所求的微分表达式是

$$du = c_v dT + [T(\partial P/\partial T)_v - P] dv$$

- 4.179 证明 $(\partial h/\partial v)_T = T(\partial P/\partial T)_v + v(\partial P/\partial v)_T$.

解 4.179 根据关系式 $(\partial h/\partial P)_T = v - T(\partial v/\partial T)_P$ 证明(题 4.177). 由于 $(\partial h/\partial P)_T = (\partial h/\partial v)_T (\partial v/\partial P)_T$, 因此 $(\partial h/\partial v)_T = v(\partial P/\partial v)_T - T(\partial P/\partial T)_T (\partial v/\partial T)_P$. 将循环方程式代入最后的一个式子就完

成这个证明.

4.180 理想气体的(比)焓随压强怎样变化?

解 题 4.177 给出 $(\partial h / \partial P)_T = 0$. 事实上, 动理论告诉我们.

$$h = u + Pv = 3/2 RT + RT = 5/2 RT$$

4.181 如果气体符合维里状态方程, 在等温情况下, 气体的(比)焓随压强怎样变化?

解 维里状态方程 $Pv = RT + BP + CP^2 + \dots$, 可写成下列形式:

$$Z = 1 + [(BP/R) + (CP^2/R) + \dots] T^{-1}$$

题 4.177 给出 $f(B, C, \dots)$ 都仅仅是 T 的函数:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T &= -\frac{RT^2}{P} \{ [(B'P/R) + (C'P^2/P) + \dots] T^{-1} - [(BP/R) + (CP^2/R) + \dots] T^2 \} \\ &= (B - B'T) + (C - C'T)P + \dots \end{aligned}$$

4.182 推导范德瓦耳斯气体在等温变化时, 内能随压强变化的普适方程.

解 状态方程可写成 $P = RT/(v-b) - a/v^2$; 那么 $(\partial P / \partial T)_v = R/(v-b)$. 从题 4.178, $\Delta u =$

$$\int [T(\partial P / \partial T)_v - P] dv, \text{ 将 } P \text{ 和 } (\partial P / \partial T)_v \text{ 的结果代入, 可得到}$$

$$\Delta u = \int (a/v^2) dv = a(1/v_1 - 1/v_2)$$

4.183 一资料引用了“任何一种液体的热力学状态方程” $P = T(\partial P / \partial T)_v - (\partial u / \partial v)_T$, $v = T(\partial v / \partial T)_P - (\partial h / \partial P)_T$. 推导这些方程式.

解 这些方程式分别是题 4.178 和 4.177 的方程的重新组合.

4.184 (a) 什么是特征方程? 什么是基本方程? (b) 设单位质量液体的自由能(亥姆霍兹)方程由下列形式给出 $f = aT(b - \ln T) - c/[T(v+d)] - RT \ln(v-e) - \phi$, 这里 a, b, c, d, e, ϕ 是常数, R, T 和 v 代表通常它们所代表的意义. 求流体的特征方程.

解 (a) 当一些资料交换使用“基本的”, “经典的”和“特征的”这些词语的时候, 另外一些资料用下面的四个方程式保留前两个形容词所代表的意义 $f = f(v, T)$; $g = g(P, T)$; $h = h(P, s)$ 和 $u = u(s, v)$; 从任何一个方程, 系统的热力学性质都可以被推得. “热力学”状态方程, $F(P, v, T) = 0$ 是“特征的”而不是“基本的”.

(b) 根据定义, $f = u - Ts$, 和第一定律给出的 $df = Pd v - s dT$. 可以得到

$$P = - \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)_T = \frac{-c}{T(v+d)^2} + \frac{RT}{v-e} \quad \text{或者} \quad \left[P + \frac{c}{T(v+d)^2} \right] (v-e) = RT$$

这是克劳修斯状态方程.

4.185 (a) 证明亥姆霍兹方程(常系数)

$$f = A - BT + CT(1 - \ln T) - \frac{D}{2} T^2 + E \ln T - RT \ln(v-b) - \frac{a}{v}$$

包含了范德瓦耳斯方程; (b) 证明对于这种气体, $c_v = c_v(T)$.

解 (a) $P = - \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)_T = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$ 或者 $\left(P + \frac{a}{v^2} \right) (v-b) = RT$

(b) 根据题 4.184(b),

$$s = - \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_v$$

因此,

$$c_v = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v = - T \left(\frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \right)_v$$

因为 f 的最后两项和 T 是成线性关系的, 所以很明显 c_v 是独立于 v 的.

4.186 如果亥姆霍兹方程是 $f = -T(A + B \ln T + c \ln v)$, A, B, c 是常数, 求: (a) 状态方程; (b) 系统关于热容量 c_p 和 c_v 的表达式.

解 (a) $P = - \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)_T = \frac{cT}{v}$ 或者 $Pv = cT$

(b) 根据题 4.184(b),

$$c_v = -T \left(\frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \right)_v = -TB \frac{d^2}{dT^2} (T \ln T) = B$$

那么,根据题 4.157,

$$c_p = c_v + T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_v \left(\frac{dv}{dT} \right)_p = B + T \left(\frac{c}{v} \right) \left(\frac{c}{P} \right) = B + \frac{c^2 T}{cT} = B + c$$

- 4.187 一种纯净物质遵循塞林德(Callendar)状态方程, $P(v-b) = RT - a/P^n$, 这里 a, b 和 n 都是常数. 在参考压强为 P_0 时, 它的等压比热是 $c_{p0} = c_0 + c_1 T + c_2 T^2$, 这儿 c_0, c_1, c_2 都是常数. 证明吉布斯方程 $g = h - Ts$, 由下面的式子给出:

$$g = c_0 T(1 - \ln T) - c_1 \frac{T^2}{2} - c_2 \frac{T^3}{6} + RT \ln P + a/nP^n + bP + A + BT$$

解 从 $dg = vdP - sdT$, T 是一个常数, 可以得到

$$g = \int vdP = \int \left[b + \frac{RT}{P} - \frac{a}{P^{n+1}} \right] dP = bP + RT \ln P + \frac{a}{nP^n} + \phi(T) \quad (1)$$

这里 $\phi(T)$ 是一个积分常量. 我们还可以得到

$$\left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_P = -s \quad \left(\frac{\partial^2 g}{\partial T^2} \right)_P = -\frac{c_p}{T} \quad (2)$$

在 $P = P_0$ 时, 将式(2)代入(1),

$$\frac{d^2 \phi}{dT^2} = -\frac{c_{p0}}{T} = -\frac{c_0}{T} - c_1 - c_2 T \quad (3)$$

将式(3)积分两次可以得到

$$\phi(T) = c_0 T(1 - \ln T) - c_1 \frac{T^2}{2} - c_2 \frac{T^3}{6} + A + BT \quad (4)$$

这里 A, B 是任意常数. 式(1)和(4)就是所求结果.

- 4.188 建立第一吉布斯-亥姆霍兹方程 $h = g - T(\partial g / \partial T)_P$.

解 根据题 4.187(2), $h = g + Ts = g - T(\partial g / \partial T)_P$.

- 4.189 建立第二吉布斯-亥姆霍兹方程 $u = f - T(\partial f / \partial T)_v$.

解 根据题 4.184(b), $u = f + Ts = f - T(\partial f / \partial T)_v$.

- 4.190 如果使用修正过的伯斯洛(Bertholet)状态方程

$$Pv = RT \left[1 + \frac{9}{128} \left(\frac{P_r}{T_r} \right) \left(1 - \frac{6}{T_r^2} \right) \right]$$

证明导致理想气体等压热容量的修正量为 $\Delta c_p = (81R/32)(P_r/T_r^3)$.

解 令 $P_r = RT/P$; 那么 $v = (RT/P) + B$ 所以 $(\partial v / \partial T)_P = (R/P) + B'(T)$, $(\partial^2 v / \partial T^2)_P = B''(T)$. 根据题 4.154(a), $(\partial c_p / \partial P)_T = -T(\nabla^2 v / \partial T^2)_P = -TB''(T)$ 所以真实气体的比热 $c_p(P, T)$ 和理想气体的比热 $c_p(0, T)$ 的差别是 $\Delta c_p = c_p(P, T) - c_p(0, T) = -TB''(T)P$. 从题 4.206, $B(T) = (9RT_c/128P_c)(1 - 6T_c^2/T^2)$. 用这个式子计算 B'' , 根据 $P = P_r$ 和 $T = T_r T_c$, 可以得到上述结果.

- 4.191^D 在 100K 时, 在恒定压强下空气的理想气体比热是 1.0021 kJ/kg · K. 用伯斯洛修正(题 4.190)估算在恒定压强为 1bar 和 5.6727bar 时的比热的值, 并将结果分别和 1.405 与 1.373 kJ/kg · K 相比较.

解 对于空气, $P_c \approx 37.7$ bar (用 \approx 是因为空气是混合物, 没有确定的临界压强); 所以在 1bar 时, $P_r = P/P_c = 1/37.7 = 0.0265$. 在 100K 时, $T_r = T/T_c = 100/132.6 = 0.7541$. 因此, 当 $R = 0.28704$ kJ/kg · K 时, $\Delta c_p = (81/32)(0.28704)(0.0265)/(0.7541)^3 = 0.0449$ kJ/kg · K, $c_p(1\text{bar}, 100\text{K}) = c_{p0} + \Delta c_p = 1.0021 + 0.0449 = 1.0470$ kJ/kg · K. 文献中列出的值是 1.045 kJ/kg · K, 所以估计的值误差为 $0.002/1.045 \approx 0.19\%$. 如果没有修正, 误差将是 4.1%.

在 5.6727bar 时, $P_r = 0.1505$, 修正值是 $(81/32)(0.28704)(0.1505)/(0.7541)^3 = 0.2550$ kJ/kg · K. 因此, $c_p(5.6727\text{bar}, 100\text{K}) = c_{p0} + \Delta c_p = 1.0021 + 0.2550 = 1.2577$ kJ/kg · K. 文献中列出的值是 1.373 kJ/kg · K, 在这里表明伯斯洛修正误差为 8.4% (没有修正的误差值为 27%). 可以看出对于相对简单一点的分子, 即使当压强接近饱和的时候伯斯洛修正也是起作用的.

- 4.192^D 在 200 °R 时, 在恒定压强下空气的理想气体比热是 0.2400 Btu/lb_m · °R. 用伯斯洛修

正(题 4.190)估算在 75psia 和 200 °R 时的比热。

解 对于空气, $P_r \approx 547$ psia (用 \approx 是因为空气是混合物, 没有确定的临界压强); 那么在 75psia 时, $P_r = P/P_c = 75/547 = 0.137$, 在 200 °R 时, $T_r = T/T_c = 200/238.7 = 0.838$. 因此, 当 $R = 0.0685 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 时, $\Delta c_p = (81/32)(0.0685)(0.137)/(0.838)^3 = 0.0404 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $c_p = c_{p0} + \Delta c_p = 0.2400 + 0.0404 = 0.2804 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ [表中列出的值是 $0.273 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$]

- 4.193^D 300K 时, 在恒定的压强下 R12 的理想气体比热是 $0.6024 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 用伯斯洛修正(题 4.190)估算在恒定压强为 1bar 和 6.841bar 时的比热, 并将结果分别和 0.6144 与 $0.7170 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 的值相比较。

解 R12 在 1bar 时, $P_r = P/P_c = 1/41.2 = 0.0243$. 在 300K 时, $T_r = T/T_c = 300/322.6 = 0.7541$. 因此当 $R = 0.06877 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 时, $\Delta c_p = (81/32)(0.06877)(0.0243)/(0.788)^3 = 0.0090 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $c_p(1\text{bar}, 300\text{K}) = c_{p0} + \Delta c_p = 0.6024 + 0.0090 = 0.6114 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 文献中列出的值是 $0.6144 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 所以估计的值误差为 $0.0030/0.6144 = 0.49\%$. (如果没有修正, 误差将是 1.9% .)

在 6.841bar 时, $P_r = 0.1660$, $\Delta c_p = (81/32)(0.06877)(0.1660)/(0.7788)^3 = 0.0613 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此, $c_p(6.841\text{bar}, 300\text{K}) = 0.6024 + 0.0613 = 0.6637 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 文献中列出的值是 $0.7170 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 估算的值误差为 7.4% (没有修正的值误差为 16.0%). 在 300K 时, 6.841 是饱和蒸汽压, 可以看出伯斯洛方程对于一般偏离理想条件的情况是近似有效的。

- 4.194^D 在 40°F 时, 在恒定压强下 R12 的理想气体比热是 $0.1385 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 用伯斯洛修正(题 4.190)估算在恒定压强为 51.67psia 和 40°F 时的比热的值并将你的结果和文献中的值 $0.157 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 相比较。

解 R12 在 $P_c = 51.67$ psia 时, $P_r = P/P_c = 51.67/598 = 0.0864$, 在 500 °R 时, $T_r = T/T_c = 500/693.4 = 0.721$. 因此, 当 $R = 0.01642 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 时, $\Delta c_p = (81/32)(0.01642)(0.0864)/(0.721)^3 = 0.0096 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $c_p = c_{p0} + \Delta c_p = 0.1385 + 0.0096 = 0.1481 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 表中列出的值是 $0.157 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 所以估算的值误差为 5.7% . 因为 51.67psia 是表中列出的蒸汽压, 可以看出伯斯洛修正提供了一个真实值的合理估算。

- 4.195^D 500K 时, 水蒸气在恒定的压强下的理想气体比热是 $1.9542 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 用伯斯洛修正(题 4.190)估算在恒定压强为 1bar 和 26.40bar 时的比热的值, 并将结果分别和 1.9817 与 $3.27 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 相比较。

解 水蒸气在 1bar 时, $P_r = P/P_c = 1/220.6 = 4.533 \times 10^{-4}$, 在 500K 时, $T_r = T/T_c = 500/647.1 = 0.7727$. 因此当 $R = 0.4615 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 时, $\Delta c_p = (81/32)(0.4615)(4.533 \times 10^{-4})/(0.7727)^3 = 0.0011 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $c_p(1\text{bar}, 500\text{K}) = c_{p0} + \Delta c_p = 1.9542 + 0.0011 = 1.9553 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 文献中列出的值是 $1.9817 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 所以估计的值误差为 $0.0264/1.9817 = 1.33\%$. 如果没有修正, 误差将是 1.39% . 对水蒸气——一种高度极化的气体——伯斯洛修正没有任何改进(尽管这里简约温度和题 4.193 里的一样).

在 26.40bar 时, $P_r = 26.40/220.6 = 0.1197$, 可以得到 $\Delta c_p = 0.3031 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此 $c_p(26.40\text{bar}, 500\text{K}) = c_{p0} + \Delta c_p = 1.9524 + 0.3031 = 2.2573 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 文献中列出的值是 $3.27 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 估算值的误差为 31% . 由于 26.40 是饱和蒸汽压, 伯斯洛修正不能对水蒸气这样的例子适用。

- 4.196^D 300°F 时, 水蒸气在恒定压强下的理想气体比热是 $0.04569 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 用伯斯洛修正(题 4.190)估算在恒定压强为 15psia 和 67psia 时的比热的值并将你的结果和文献中的值 0.4729 与 $0.5508 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 相比较。

解 水蒸气在 $P_c = 15$ psia 时, $P_r = P/P_c = 15/3200 = 0.00469$, 在 760 °R 时, $T_r = T/T_c = 760/1165 = 0.6524$. 因此, 当 $R = 0.1102 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 时, $\Delta c_p = (81/32)(0.1102)(0.00469)/(0.6524)^3 = 0.0047 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $c_p = c_{p0} + \Delta c_p = 0.4569 + 0.0047 = 0.4616 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 和文献中的值有 2.4% 的差别. 如果不使用修正值, 会有 3.4% 的差别; 所以使用修正值会使结果的准确性得到适度的提高。

在 67psia 时, $P_r = 67/3200 = 0.0209$, $\Delta c_p = (81/32)(0.1122)(0.0209)/(0.6524)^3 = 0.0210 \text{ Btu/lb}_m$

• °R; 因此 $c_p = c_{p0} + \Delta c_p = 0.4569 + 0.0201 = 0.4779 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 跟文献的值比较有 13.3% 的差别. 压强 67 psia 是 300°F 时的饱和压强; 可以看出对于像水蒸气那样极性很高的物质修正只对低压时有效.

位力膨胀

- 4.197 (a) 什么是位力膨胀, 在分子动力学里它的基础是什么? (b) 在推导热力学性质时为什么位力膨胀的使用受到限制?

解 (a) 位力膨胀(状态方程)的形式是

$$Pv = RT + \sum_{i=1}^{\infty} A_i P^i \quad \text{或者} \quad Pv = RT + \sum_{i=1}^{\infty} a_i v^{-i}$$

系数 A_i 和 a_i 都是 T 的函数. 原则上, 位力系数 A 或 a 和两个气体分子的相互作用有关; 位力系数 A_2 和 a_2 和三个气体分子的相互作用有关. 注意到对于理想气体, 所有的位力系数均为零(没有分子间作用力).

(b) 当接近饱和边界的时候, 不为零的位力系数的数目增加很快, 从第二个系数开始计算得到的位力系数的精确度就明显下降了, 如果分子是极性分子, 由于其内部的自由度也很重要等原因, 增加了计算的复杂性.

- 4.198 证明下面两个式子(i) $Pv = A + BP + CP^2 + \dots$ 和(ii) $Pv = a + b/v + c/v^2 + \dots$ 中, 位力系数可以通过下列方程联系起来

$$A = a \quad B = b/a \quad C = (ac - b^2)/a^3 \dots$$

或者, 反过来

$$a = A \quad b = AB \quad c = AB^2 + A^2 C \dots$$

解 将(ii)式除以 v 并将(i)式右边的 P 的结果代入, 可得到

$$Pv = A + B\left(\frac{a}{v} + \frac{b}{v^2} + \dots\right) + C\left(\frac{a}{v} + \frac{b}{v^2} + \dots\right)^2 + \dots = A + \frac{Ba}{v} + \frac{Bb + Ca^2}{v^2} + \dots$$

跟(ii)式比较, 可得到

$$A = a \quad Ba = b \quad Bb + Ca^2 = c \quad \dots$$

由这个关系同样得到上述方程.

- 4.199 一种气体的状态方程为 $Z = 1 + B/v$, B 是一个正的常数. (a) 重新将方程写成 $P = f(v, T)$ 的形式; (b) 将方程写成只含有 P, T, Z , 不含有 v .

解 (a) 因为 $Z = Pv/RT$, 所以 $Pv/RT = 1 + B/v$, 或者 $P = RT/v + BRT/v^2$.

(b) 由于 $v = RTZ/P$, $Z = 1 - BP/RTZ$.

- 4.200 用位力系数的形式表示范德瓦耳斯方程, $(P + a/v^2)(v - b) = RT$.

$$\begin{aligned} \text{解} \quad Pv &= -\frac{a}{v} + RT \frac{1}{1 - (b/v)} = -\frac{a}{v} + RT \left[1 + \frac{b}{v} + \left(\frac{b}{v}\right)^2 + \dots \right] \\ &= RT + \frac{bRT - a}{v} + \frac{b^2 RT}{v^2} + \frac{b^3 RT}{v^3} + \dots \end{aligned}$$

因为 $v > b$, 所以数学上来说是收敛的(这通常是应用时的一个实际情况).

- 4.201 用位力系数的形式表示迭特里奇方程, $P e^{a/RTv} (v - b) = RT$.

$$\begin{aligned} \text{解} \quad Pv &= RT \frac{1}{1 - (b/v)} e^{-a/RTv} \\ &= RT \left[1 + \frac{b}{v} + \left(\frac{b}{v}\right)^2 + \dots \right] \left[1 - \frac{a}{RTv} + \frac{1}{2!} \left(\frac{a}{RTv}\right)^2 - \dots \right] \\ &= RT + \frac{bRT - a}{v} + \frac{b^2 RT - ab + (a^2/2RT)}{v^2} + \dots \end{aligned}$$

所以数学上来说 $v > b$ 时几何级数随着位力膨胀是收敛的. 注意对于迭特里奇气体和范德瓦耳斯气体(题 4.200)在一次项上是一致的.

- 4.202 一种气体的位力方程是 $Pv = a_0 + a_1/v + a_2/v^2 + \dots$, 证明当

$$\left(\frac{\partial Pv}{\partial P} \right)_T = 0$$

时的玻意耳温度近似可以由方程 $a_1(T)=0$ 给出.

解 令 $x=Pv$, 所以位力方程可写为

$$x = a_0 + a_1 \frac{P}{x} + a_2 \frac{P^2}{x^2} + \dots$$

将 T 作为常数求微分, 得

$$\frac{dx}{dP} = a_1 \frac{x - P(dx/dP)}{x^2} + a_2 \frac{2x^2P - 2P^2x(dx/dP)}{x^4} + \dots$$

在玻意耳温度时, 这就变成 $0 = a_1/x + 2a_2P/x^2 + \dots$, 或者, 对一次项, $a_1 = 0$.

4. 203 计算下列玻意耳温度(T_B): (a) 范德瓦耳斯气体, (b) 迭特里奇气体.

解 从题 4. 200~4. 202, 对任何一种气体 $T_B \approx a/bR$. 对于范德瓦耳斯气体(见题 4. 56)简约值是 $T_B \approx 27/8$, 对于迭特里奇气体(见题 4. 59) $T_B \approx 4$. 这样, 这两个模型存在一较大的物理差别.

4. 204 将方程 $(P + a/T^u v^2)(v - b) = RT$ 表示成位力形式.

解 见题 4. 200, 将 a 用 a/T^u 代入.

4. 205 对于题 4. 204 中的气体, 它的玻意耳温度是多少?

解 根据题 4. 204 和 4. 202, $bRT_B - a/T_B^u \approx 0$, 或者 $T_B \approx (a/bR)^{1/(u+1)}$. 题 4. 68 给出了 $T_B \approx (27/8)^{1/(u-1)}$.

4. 206 计算修正的伯斯洛状态方程的第二位力系数(题 4. 190).

解 经检验:

$$B = RT \left(\frac{9}{128} \right) \left(\frac{1}{P_c T_c} \right) \left(1 - \frac{6}{T_c^2} \right) - \frac{9RT_c}{128P_c} \left(1 - \frac{6T_c^2}{T^2} \right)$$

4. 207 对修正的伯斯洛状态方程玻意耳温度是多少?

解 根据题 4. 198, 4. 202 和 4. 206, 条件是 $AB \approx 0$, 或者 $B=0$, 或者 $T_B \approx T_c \sqrt{6}$.

4. 208 如果位力状态方程写成 $Z = 1 + B/v + C/v^2 + D/v^3 + \dots$, 那么由统计力学得 $B = (2\pi/\mu) \int_0^\infty (1 - e^{-E/kT}) r^2 dr$ (在这里 $\mu = M/N$ = 分子质量 N = 阿伏伽德罗常数); $k = R_v/N$ = 玻尔兹曼常数; r = 一对分子(中心到中心)之间的间距; $E = E(r)$ = 一对分子间相互作用的势能. 如果分子看成是直径为 σ 的刚性球, 那么当 $r > \sigma$ 时, $E(r) = 0$, 当 $r < \sigma$ 时, $E(r) = \infty$, 计算 B .

解 $B = (2\pi/\mu) \int_0^\sigma (1) r^2 dr = 2\pi\sigma^3/3\mu$, 即 B 是分子球体积的 4 倍.

4. 209 根据题 4. 208, 计算方势阱

$$E(r) = \begin{cases} 0 & r > \lambda\sigma \\ -\epsilon & \sigma < r < \lambda\sigma \quad (\lambda > 1) \\ \infty & r < \sigma \end{cases}$$

的第二位力系数.

解 $\frac{\mu B}{2\pi} = \int_\sigma^\infty 0 dr + \int_\sigma^{\lambda\sigma} (1 - e^{\epsilon/kT}) r^2 dr + \int_0^\sigma (1) r^2 dr$
 $= (1 - e^{\epsilon/kT})(\lambda^3 - 1)(\sigma^3/3) = [(1 - e^{\epsilon/kT})(\lambda^3 - 1) + 1](\sigma^3/3)$

4. 210 对于题 4. 209 的气体, 它的玻意耳温度是多少?

解 当 $\sigma=0$ 时, B 等于零(理想气体由质点分子组成), 或者由 $(1 - e^{\epsilon/kT})(\lambda^3 - 1) + 1 = 0$, 解得

$$T_B = \frac{\epsilon/k}{-\ln(1 - \lambda^{-3})}$$

注意因为 $\epsilon > 0, \lambda > 1, T_B$ 是正的.

相变

4. 211 解释相变一词.

解 物质的三个态或者三个相指的是固态、液态和气态. 固态可以有不同的结构, 或者同素异

形体。一个例子是固体-氧化碳,它就像装在盒子里的雪茄烟,分子可以排列成 $(\text{CO}, \text{CO}, \text{CO}, \dots)$ 或者 $(\text{CO}, \text{OC}, \text{CO}, \dots)$ 。相变是从一个相变化到另一个相。

4.212 列出不同的相变名称。

解 (1) 固态 \rightarrow 液态: 熔化, 熔解。 (2) 液态 \rightarrow 固态: 冻结, 凝固, 结晶。 (3) 液态 \rightarrow 气态: 蒸发, 沸腾。 (4) 气态 \rightarrow 液态: 冷凝。 (5) 固态 \rightarrow 气态: 气化, 升华。 (6) 气态 \rightarrow 固态: 凝结, 凝固。 (7) 固态 \rightarrow 固态: $\alpha \rightarrow \beta$ 的转变, 等等(这里 α, β 表示同素异形体)。

4.213 (a) 叙述平衡系统的吉布斯相律; (b) 说明它的应用。

解 (a) 令 F = 多元复相系的力学自由度 = 多元复相系可以独立改变的热力学参量的数目, c = 系统组元(即不同的材料)的数目, P = 系统相的数目。那么, $F = c - P + 2$ 。

(b) 对于过热水蒸气: $c = 1$ (只有水物质), $P = 1$ (只有气相); 因此 $F = c - P + 2 = 2$ 。两个自由度可以被解释为过热水蒸气的压强和温度。同样的推理可以运用于液态(水)和固态(冰)。

对于气液平衡状态: $c = 1$ (只有水物质), $P = 2$ (气液两相同时存在); 因此 $F = c - P + 2 = 1$ 。对于纯气液平衡, 可以改变的性质只有每种相的多少, 即数量。

在三相点: $c = 1$ (纯物质), $P = 3$ (三相同时存在); 因此 $F = c - P + 2 = 0$ 。系统没有自由度这一点说明了三相点是惟一的。

4.214 题 4.213 中的相律证明了仅在一个条件下三相处于平衡状态。实际上只有两相存在时, 为何称作临界点?

解 P 没有很好的定义的时候, 相律不成立。通过次临界温度接近临界点时得出 $P = 2$ (气态和液态); 通过超临界温度接近临界点时得到 $P = 1$ (气态)。(见图 E3)

4.215 从几何图形的思想证明三相点只能是一点。

解 假设图 4-5 是压强-温度图, 在 $A_1 A_2 A_3$ 三点围成的三角形区域内水处于什么状态? 因为它在结晶线的下面, 物质完全是气态; 由于在蒸汽线的上方, 所以物质完全处于液态; 由于它在冰线的左边, 物质完全处于固态。三角形必然收缩为一点。

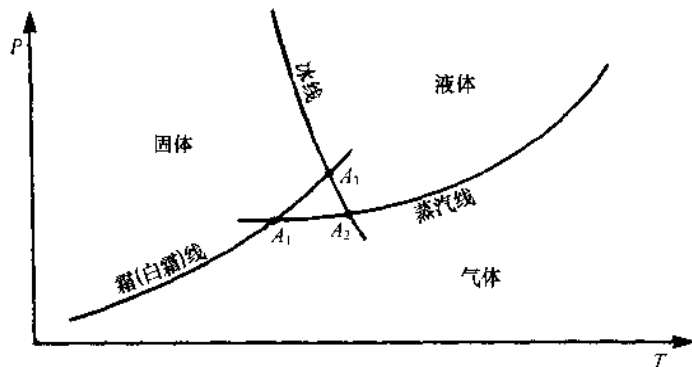


图 4-5

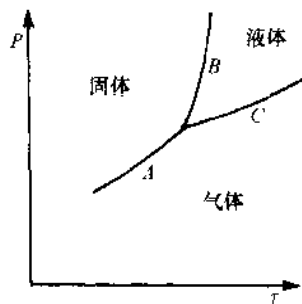


图 4-6

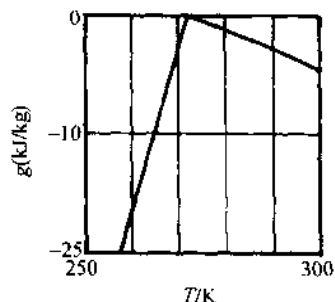


图 4-7

4.216 从图 4-6 的“正常”的蒸汽压曲线证明在它们的交点(三相点), $(dP/dT)_B > (dP/dT)_A > (dP/dT)_C$ 。

解 克拉珀龙方程给出: 曲线 A, $(dP/dT)_A = \Delta h_{fg}/T(v_g - v_f)$; 曲线 B, $(dP/dT)_B = \Delta h_{if}/T(v_l - v_s)$; 曲线 C, $(dP/dT)_C = \Delta h_{ik}/T(v_k - v_f)$. 在三相点, 这些方程中的温度都是相等的 ($T = T_u$), $\Delta h_{fg} = \Delta h_{fk}$; 因此, $(dP/dT)_A(v_g - v_f) = (dP/dT)_B(v_l - v_s) = (dP/dT)_C(v_k - v_f)$

或者 $(v_g - v_f) \left[\left(\frac{dP}{dT} \right)_A - \left(\frac{dP}{dT} \right)_C \right] = (v_l - v_s) \left[\left(\frac{dP}{dT} \right)_B - \left(\frac{dP}{dT} \right)_A \right] \quad (1)$

因为 $v_g > v_l > v_s$, 所以 $v_g - v_f > 0$, $v_l - v_s > 0$, 式(1)中两个括号内的量一定符号相同——十号, 这隐含了曲线斜率的大小.

4.217 区分一阶相变和二阶相变.

解 在一阶相变中, 固体结构出现很大的尺度上的变化. 一个例子就是冰的熔化. 二阶相变没有很大的变化出现; 相变中, 热力学性质是连续变化的.

4.218 用蒸汽表计算吉布斯函数, $g = h - Ts$, 证明冰的融化是一阶相变. g, v, s 都是温度的函数.

解 将表 A2 稍作扩充, 我们可以得到表 4-12.

表 4-12

T/K	250	260	270	273.15	273.15	280	290	300
$h/(kJ/kg)$	-381.5	-360.5	-339.6	-333.5	0.0	28.8	70.7	112.5
$s/(kJ/kg \cdot K)$	-1.400	-1.323	-1.246	-1.221	0.000	0.104	0.251	0.393
$g/(kJ/kg)$	-31.5	-16.5	-3.2	0.0	0.0	-0.3	-2.1	-5.4
$10^3 v/(m^3/kg)$	1.087	1.088	1.090	1.090	1.000	1.000	1.001	1.002

从图 4-8, 4-9 可以看出在熔点 v 和 s 的不连续性. 因此相变是一阶相变.

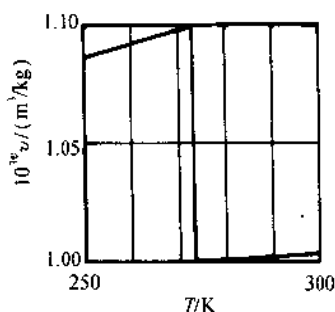


图 4-8

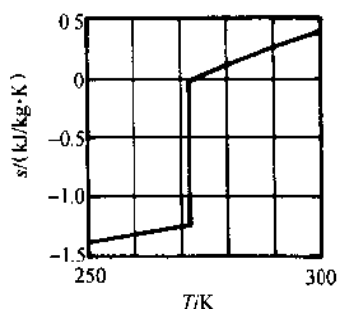


图 4-9

4.219 下面是一种金属熵的值.

T/K	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400
$s/(kJ/kg \cdot K)$	2.601	2.705	2.761	2.920	1.888	2.070	2.258	2.450

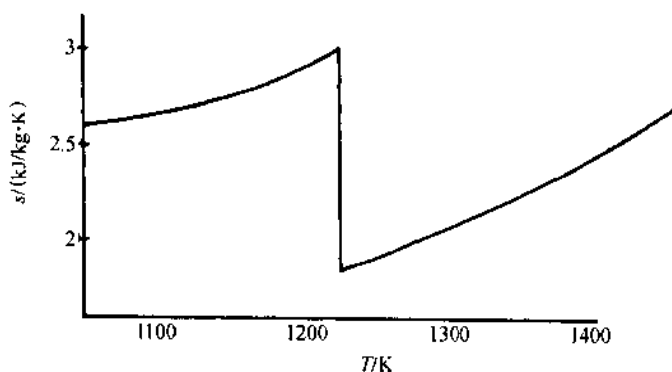


图 4-10

(a) 区分相变是一阶相变还是二阶相变; (b) 作进一步的说明.

解 (a)图 4-10 是焓-温度图,在 1225K 时焓是不连续的,所以表明是一阶相变.

(b)图中数据表明了加热物质导致了熵的突然减小.这样,或者是在低于 1225K 时物质处于亚稳态,或者数据是错的.

4.220 什么是瑞恩法斯特(Ehrenfest)方程? 什么时候使用该方程?

解
$$\frac{dP}{dT} = \frac{1}{\alpha T} \left(\frac{\Delta c_p}{\Delta \alpha} \right)$$

这里 α 是热膨胀系数, Δ 表示经过相变后的变化. 跟克劳修斯-克拉珀龙方程相反, 方程在常体积不成立. 它在二阶相变中使用.

4.221 推导瑞恩法斯特方程.

解 根据题 4.176(b), 当 T 和 P 有很小的变化时,

$$\Delta s = \frac{c_p}{T} \Delta T - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \Delta P = \frac{c_p}{T} \Delta T - \alpha v \Delta P$$

这里和题 4.81 很接近, 只是将 g 换成 s . 这是有效的, 因为假定在二阶相变中, s 像 g 一样是一个常数.

综合题

4.222^D 在海斯特费尔德(Hirschfelder)等著“气体和液体的分子理论”一书中, 我们可以得到 ϵ/k (一个特征温度——参见题 4.210) 是 $0.292T_B$, 这里 T_B 是玻意耳温度. 我们还可以得到 $\epsilon/k = 1.15T_b$, 这里 T_b 是通常的沸点; 且 $\epsilon/k = 0.77T_c$, 这里 T_c 是临界温度. 从这些关系式得到的空气的玻意耳温度是多少?

解 如果 $\epsilon/k = 0.292T_B = 1.15T_b = 0.77T_c$, 那么 $T_B = 3.94 T_b = 2.64T_c$. 对空气, $T_b \approx 81.6\text{K}$, $T_c \approx 132.6\text{K}$. 所以, $T_B = 3.94(81.6) = 322\text{K}$ 或者 $T_B = 2.64(132.6) = 350\text{K}$. 我们估算得到的玻意耳温度是 $74^\circ\text{C} = 347\text{K}$. 根据原出处中使用的近似值, 这些值互相之间的一致是合理的.

4.223^D 根据题 4.222 的关系式得到的空气的玻意耳温度($^\circ\text{F}$)是多少?

解 对空气, $T_b \approx -313^\circ\text{F}$, $T_c \approx -221^\circ\text{F}$. 所以, $T_B = 3.94(147) = 578^\circ\text{R}$ 或者 $T_B = 2.64(239) = 630^\circ\text{R}$. 我们估算得到的玻意耳温度是 $165^\circ\text{F} = 625^\circ\text{R}$. 根据原出处中使用的近似值, 这些值互相之间的一致是合理的.

4.224 用题 4.222 中推导的关系式 $T_B = 3.94T_b = 2.64T_c$ 估算 R12 的玻意耳温度(K 和 $^\circ\text{F}$), 假设(根据英国的出版物) $T_b = 243.22\text{K}$, $T_c = 384.95\text{K}$.

解 根据 T_b 的方程式, $T_B = 3.94(243.33) = 959\text{K}$; 根据 T_c 的方程式, $T_B = 2.64(384.95) = 1016\text{K}$. 因此据推测, 玻意耳温度可能是 $(1000 \pm 50)\text{K}$. 如果和空气的玻意耳温度一样, 那 T_c 的方程式估计高了, 而 T_b 的方程式估计低了. 然而像 R12 这样一个复杂的分子是否遵循简单的推测还不能被确定, 因为没有在 1000K 时关于 R12 真实气体的表可以利用. 结果为 $(1000 \pm 50)\text{K}$ 或 $(1800 \pm 1000)^\circ\text{F}$.

4.225 用题 4.222 中推导的关系式 $T_B = 3.94T_b = 2.64T_c$ 估算水蒸气的玻意耳温度(K 和 $^\circ\text{F}$), 一般情况下沸点是 100°C (212°F), 临界点是 647K (1165°R).

解 将已知数据转化为所需要的绝对温度, $T_b = 3.94 T_b = 3.94(373.15) = 1470\text{K}$; $T_B = 3.94(671.69) = 2646^\circ\text{R}$. $T_c = 2.64(647) = 1708\text{K}$, $T_B = 2.64(1165) = 3076^\circ\text{R}$. 如果临界温度公式预测稍高而沸点公式预测稍低, 我们可以估计 $T_B \approx 1650\text{K} = 1377^\circ\text{C}$ 或者 $T_B \approx 3000^\circ\text{R}$.

水蒸气的 Haar 表格等, 一直到 2000°C . 从表中估算 Pv 乘积, 可以得到 1200°C 情况下, 在 1bar 时, $Pv = 6799$, 10bar 时为 6798 , 100bar 时为 6796 ; 在 1300°C 情况下, 在 1bar 时, $Pv = 7260$, 10bar 时为 7261 , 100bar 时为 7270 . 1250°C 时的值可能是正确的, 即 1525K 或者 2750°F . 从第二位力系数的数据分析可以得到 $T_B = (1530 \pm 20)\text{K}$, 或者 $(2750 \pm 50)^\circ\text{F}$.

4.226 什么是 Bridgeman 表?

解 一个偏微分形式的详细的表格,

$$(\partial \psi)_A = \phi_i + a_i (\partial \Phi_i / \partial T) + b_i (\partial \Phi_i / \partial v) + c_i (\partial \Phi_i / \partial P)$$

这里 ϕ, Φ 都是热力学函数, 就像 P, v, T, h, s 一样. 将两个表达式相除, 很快得到偏微分 $(\partial\phi/\partial\mu)_T$.

4.227 什么是离心参数?

解 参数由下面的式子定义 $\omega = -1 - \log(P_g/P)$, 式中 P_g 是 $T_r = 0.7$ 时的饱和蒸汽压.

4.228 证明在理想气体中音速是 $a = \sqrt{kRT}$, 这里, $k = c_p/c_v$.

解 从牛顿定律可证明若压强变化 ΔP , 引起密度改变 $\Delta\rho$, 机械能传播的速度 $a = \sqrt{\Delta P/\Delta\rho}$. 假设是一个等熵过程, 从题 2.328 可得到

$$\frac{P}{\rho^k} = \text{常数} \quad \text{或者} \quad \frac{\rho^k \Delta P - P k \rho^{k-1} \Delta\rho}{\rho^{2k}} = 0$$

即

$$\frac{\Delta P}{\Delta\rho} = \frac{kP}{\rho} = kRT$$

第五章 稳定流动和不稳定流动

连续性方程

5.1 推导稳定流动的连续性方程.

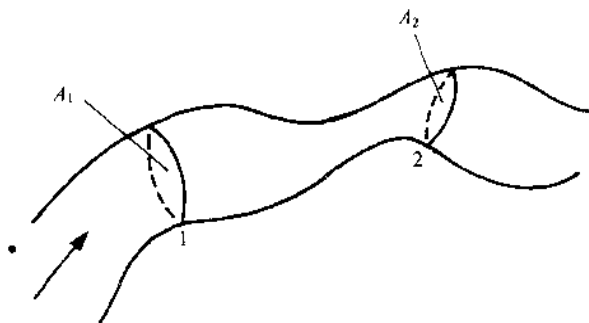


图 5-1

解 假设稳定流体在管内作稳定流动如图 5-1. 流过截面 A 的平均速度为 \bar{v} , 比体积为 v . 由于 1 至 2 段的流体质量不随时间变化, 在任意一个无穷小的时间间隔 dt 里有

流入的质量 = 流出的质量

$$\left(\frac{A\bar{v}}{v}\right)_1 dt = \left(\frac{A\bar{v}}{v}\right)_2 dt$$

由于 1 和 2 的位置是任意的, 在整个管子里都有

$$\frac{A\bar{v}}{v} = \text{常数} = \dot{m}$$

这里 \dot{m} (常数) 是质量流量 (kg/s 或 lb_m/s). 由于 $A\bar{v} = \dot{V}$ 是局部的体积流量 (m^3/s 或 ft^3/s), 连续性方程的另一种形式为 $\dot{V}/v = \text{常数} = \dot{m}$.

5.2 求下列情况的连续性方程: (a) 均匀横截面; (b) 不可压缩液体; (c) 理想气体.

解 (a) $\bar{v}/v = \text{常数}$ 或 $\rho\bar{v} = \text{常数}$

(b) $A\bar{v} = \text{常数} = \dot{V}$

(c) $A\bar{v}P/T = \text{常数} = \dot{m}R$

5.3^D 在 5bar, 500K 的空气, 以 2kg/s 的质量流量均匀地流过一个圆形输送管. 那么多大的管径能使流速达到 50m/s ? 假设在理想情况下.

解 由题 5.2(c) 可得, $(\pi d^2/4)\bar{v}P/T = \dot{m}R$, 或

$$d = 2\sqrt{\frac{\dot{m}RT}{\pi\bar{v}P}} = 2\sqrt{\frac{(2\text{kg/s})(0.287\text{kJ/kg}\cdot\text{K})(500\text{K})}{\pi(50\text{m/s})(500\text{kN/m}^2)}} = 0.12\text{m}$$

或 12cm . R 和 P 的单位要一致.

5.4^D 75psia, 500°F 的空气, 以 $51\text{lb}_m/\text{s}$ 的流量均匀流过一个圆形输送管. 那么多大的管径能使流速达到 150ft/s ? 假设在理想情况下.

解 由题 5.2(c) 得 $(\pi d^2/4)\bar{v}P/T = \dot{m}R$ 或

$$d = 2\sqrt{\frac{\dot{m}RT}{\pi\bar{v}P}} = 2\sqrt{\frac{(51\text{lb}_m/\text{s})(53.35\text{ft}\cdot\text{lb}_f/\text{lb}_m\cdot^\circ\text{R})(960^\circ\text{R})}{\pi(150\text{ft/s})(75\times 144\text{lb}_f/\text{ft}^2)}} = 0.45\text{ft} = 5.40\text{in}$$

R 和 P 的单位要一致.

5.5^D 5bar, 500K 的气体以 75m/s 的流速进入一圆管. 在下游的某一点测得压强和温度分别

为 4.75bar 和 450K. 那么该点的空气流速为多少? 假设在理想情况下.

解 由题 5.2(c), 如果 A 是常数, 则

$$\bar{v}_2/\bar{v}_1 = (T_2/T_1)(P_1/P_2) = (450/500)(5/4.75) = 0.947$$

所以,

$$\bar{v}_2 = 75 \times 0.947 = 71.1 \text{ m/s}$$

- 5.6^D 75psia, 500°F 的气体以 25ft/s 的流速进入一圆管. 在下游的某一点测得压强和温度分别为 62psia 和 450°F. 那么该点的空气流速(ft/s)为多少? 假设在理想情况下.

解 由题 5.2(c), 如果 A 不变, 则

$$\bar{v}_2/\bar{v}_1 = (T_2/T_1)(P_1/P_2) = [(460+450)/(460+500)](75/62) = 1.147$$

所以,

$$\bar{v}_2 = 25 \times 1.147 = 28.7 \text{ ft/s}$$

- 5.7^D 气体通过一个横截面积一定的圆形管道. 入口处的压强是 1.1bar, 温度是 300K. 出口处压强降为 1.0bar, 但温度仍为 300K. 如果入口的流速为 20m/s, 那么出口的流速为多少? 假设在理想情况下.

解 由题 5.2(c), 如果 A 和 T 是常数, $\bar{v}_2 = \bar{v}_1 (P_1/P_2) = (20 \text{ m/s})(1.1/1.0) = 22 \text{ m/s}$.

- 5.8^D 气体通过一个横截面积一定的圆形管道. 入口的压强是 15bar, 温度是 80°F. 出口处压强降为 14.5bar, 但温度仍为 80°F. 如果入口的流速为 75ft/s. 那么出口的流速为多少(ft/s)? 假设在理想情况下.

解 由题 5.2(c), 如果 A 和 T 是常数, $\bar{v}_2 = \bar{v}_1 (P_1/P_2) = (75 \text{ ft/s})(15/14.5) = 77.6 \text{ ft/s}$.

- 5.9^D 制冷剂 R12 以 10 m/s 的速度穿过直径为 0.1m 管子进入一个控制体. 入口的压强是 5bar, 温度是 350K. 在控制体的出口, 压强是 1bar, 其中制冷剂干度为 80%. 如果出口处直径为 0.2m, 计算: (a) 质量流量(kg/s); (b) 出口处的速度(m/s).

解 (a) 在入口处, 根据连续性方程 $\dot{m} = A_1 \bar{v}_1 / v_1$, 得出

$$A_1 = \pi d_1^2 / 4 = (3.142)(0.1)^2 / 4 = 0.00786 \text{ m}^2 \quad \bar{v}_1 = 10 \text{ m/s}$$

从表 C5 可得, $v_1 = 0.0454 \text{ m}^3/\text{kg}$, 因此,

$$\dot{m} = (0.00786 \text{ m}^2)(10 \text{ m/s}) / (0.0454 \text{ m}^3/\text{kg}) = 1.73 \text{ kg/s}$$

(b) 根据 $\bar{v}_2/\bar{v}_1 (A_1/A_2) (v_2/v_1) = (d_1/d_2)^2 (v_2/v_1)$, 这里 $(d_1/d_2)^2 = (0.01/0.02)^2 = 0.25$. 表 C4 得出在 1bar 的情况下, 给出了:

$$v_2 = (1-x_2)vf_2 + x_2vg_2 = (1-0.8)(6.719 \times 10^{-4}) + (0.8)(0.160) = 0.128 \text{ m}^3/\text{kg}$$

因此,

$$\bar{v}_2 = (10 \text{ m/s})(0.25)(0.128/0.0454) = 7.05 \text{ m/s}$$

- 5.10 一控制体入口处, 制冷剂 R12 的干度为 40%, 压强为 150psia, 入口端的直径为 6in. 出口处直径为 2in, 制冷剂处于 15psia 和 100°F 的状态. 如果 R12 以 50ft³/min 进入控制体, 计算: (a) 质量流量(lbm/min); (b) 出口速度与入口速度的比值.

解 (a) 由连续性方程得 $\dot{m} = A_1 \bar{v}_1 / v_1 = \dot{V}_1 / v_1$, 其中 $\dot{V}_1 = 50 \text{ ft}^3/\text{min}$ 是入口处的流量. 从表 C3 得

$$v_1 = (1-x_1)vf_1 + x_1vg_1 = (1-0.40)(0.01291) + (0.4)(0.270) = 0.116 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

因此,

$$\dot{m} = (50 \text{ ft}^3/\text{min}) / (0.116 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) = 431 \text{ lb}_m/\text{min}$$

(b) 根据 $\bar{v}_2/\bar{v}_1 (A_1/A_2) (v_2/v_1) = (d_1/d_2)^2 (v_2/v_1)$, 这里 $(d_1/d_2)^2 = (6/2)^2 = 9$. 从表 C5 得

$$v_2 = 3.252 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

因此,

$$\bar{v}_2/\bar{v}_1 = (9)(3.252/0.116) = 252.3 = 252/1$$

- 5.11^D 50kg/s 的流体在 100bar, 650K 的状态下进入控制体, 并且以 2bar, 550K 的状态离开. 如果入口面积为 0.01235m², (a) 求入口速度(m/s); (b) 如果流体以入口的速度离开, 那么出口的面积应为多少(m²)?

解 (a) 在入口处的条件下从表 A5 得出 $v_1 = 0.0247 \text{ m}^3/\text{kg}$.

因此,

$$\bar{v}_1 = \dot{m}v_1/A_1 = (50\text{kg/s})(0.0247\text{ m}^3/\text{kg})/(0.01235\text{m}^2) = 100\text{m/s}$$

(b)在出口处, $A_2 = \dot{m}v_2/\bar{v}_2$. 在 2bar, 550K 的时候, $v_2 = 1.262\text{ m}^3/\text{kg}$. 因此,

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_1 = 100\text{m/s} \quad A_2 = (50\text{kg/s})(1.262\text{ m}^3/\text{kg})/(100\text{m/s}) = 0.631\text{m}^2$$

5. 12^D 1500psia, 700°F 状态下流量为 100 lb_m/s 的流体进入控制体, 并且以 7.5psia, 500°F 的状态流出, 如果入口的面积 35in², (a) 求流入速度 (m/s); (b) 如果流体以入口的速度离开那么出口的面积应为多少 (ft²)?

解 (a) 在入口处的条件下从表 A3 得出

$$v_1 = 0.372\text{ft}^3/\text{lb}_m$$

因此,

$$\bar{v}_1 = \dot{m}v_1/A_1 = (100\text{lb}_m/\text{s})(0.372\text{ft}^3/\text{lb}_m)/(35\text{in}^2/144\text{in}^2/\text{ft}^2) = 153.1\text{ ft/s}$$

(b) 在出口处, $A_2 = \dot{m}v_2/\bar{v}_2$. 在 7.5psia, 500°F 的状态下, $v_2 = 76.10\text{ft}^3/\text{lb}_m$ [通过表 A3 用 Pv 插值法得到]. 因此, $\bar{v}_2 = \bar{v}_1 = 153.1\text{ft/s}$, $A_2 = (100\text{lb}_m/\text{s})(76.10\text{ft}^3/\text{lb}_m)/(153.1\text{ft/s}) = 49.71\text{ft}^2$.

5. 13^D 水在 20°C 和 100kPa 的压强下流入直径为 2.5cm (内径) 的软管. 在管子的尽头是一个直径为 0.5cm 的喷口. 如果水在管子流动的速度是 5 米/秒, 计算: (a) 质量流量 (kg/s); (b) 体积流量 (U. S. gal/s); (c) 水流出喷口的速度 (m/s).

解 (a) 我们假设水不可压缩, $v = v_f(20^\circ\text{C}) = 1.002 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg}$. 因此,

$$\dot{m} = A_1 \frac{\bar{v}_1}{v} = \frac{\pi(0.025)^2}{4} \frac{5}{1.002 \times 10^{-3}} = 2.45\text{kg/s}$$

(b) 1gal (美制) 等于 $3.7854 \times 10^{-3}\text{m}^3$ (见题 1.38) 因此体积流量

$$\dot{V} = \dot{m} \times v = (2.45\text{kg/s})(1.002 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg})/(3.785 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{gal}) = 0.648\text{gal/s}$$

(c) $\bar{v}_2 = \bar{v}_1 (A_1/A_2) = \bar{v}_1 (d_1/d_2)^2 = (5\text{m/s})(2.5/0.5)^2 = 125\text{m/s}$

5. 14^D 水在 60°F 和 20psia 流过直径为 1in 的软管. 软管的尽头的喷口直径为 1/4in. 如果管中的水流速为 1.25ft/s. 计算: (a) 质量流速 (lb/s); (b) 喷口水的流速 (ft/s).

解 (a) 我们假设水不可压缩, $v = v_f(60^\circ\text{F}) = 0.01603\text{ft}^3/\text{lb}_m$. 因此,

$$\dot{m} = A_1 \frac{\bar{v}_1}{v} = \frac{\pi(1/12)^2}{4} \frac{1.25}{0.01603} = 0.425\text{lb}_m/\text{s}$$

(b) $\bar{v}_2 = \bar{v}_1 (d_1/d_2)^2 = (1.25)(4)^2 = 20\text{ft/s}$

5. 15^D 水在 70bar 和 65°C 时进入一个内径为 25mm 的锅炉的管子. 水在离开管子时的状态为 50bar 和 700K, 速度为 100m/s. 计算: (a) 入口速度 (m/s); (b) 入口处的体积流量 (L/s).

解 (a) 由题 5.2(a), $\bar{v}_1 = (100\text{m/s})(v_1/v_2)$. 表 A5 给出 $v_2 = 0.0608\text{m}^3/\text{kg}$. 书中没有表列出温度低于 360K, 压强大于饱和压强时液体水的比体积. 如果从 70bar, 360 和 380K 状态下的数据外推, $v_1 = (1.031 \times 10^{-3}) - (22/20)(1.046 - 1.031) \times 10^{-3} = 1.019 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg}$. (这个数据可以跟 338K 时 $v_f = 1.020 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg}$ 相比较发现, 用给定温度下的比体积作为压缩液体的比体积是相当精确的.) 因此

$$\bar{v}_1 = (100\text{m/s})(1.019 \times 10^{-3}/0.0608) = 1.676\text{m/s}$$

(b) $\dot{V} = A\bar{v}_1 = (\pi/4)(0.025)^2(1.676) = 0.00082\text{m}^3/\text{s} = 0.82\text{L/s}$

5. 16^D 水在 150°F 和 1000psia 时进入一个内径为 1in 的锅炉的管子. 水在离开管子时的状态为 800°F 和 800psia, 速度为 300ft/s. 计算: (a) 入口速度 (ft/s); (b) 入口处的体积流量 (ft³/s).

解 (a) 根据题 5.2(a), $\bar{v}_1 = (300\text{ft/s})(v_1/v_2)$, 从表 A3 可得到

$$v_2 = 0.876\text{ft}^3/\text{lb}_m \quad v_1 = (300)(0.0163/0.876) = 5.58\text{ft/s}$$

(b) $\dot{V}_1 = A\bar{v}_1 = (\pi/4)(1/12)^2(5.58) = 0.0304\text{ft}^3/\text{s}$

5. 17^D 水蒸气以 100kg/s 的流量流进一个管子. 在管子某个特定部位压强是 15bar, 温度是 300°C. 如果要求在这个部位的流速达到 20m/s, 计算管子的直径 (m).

解 从连续性方程, $A = \dot{m}v/\bar{v}$. 在 573K 时, 由表 A5 中数据内插, 得

$$v = 0.162 + (23/50)(0.179 - 0.162) = 0.170 \text{ m}^3/\text{kg}$$

因此,

$$A = (100 \text{ kg/s})(0.170 \text{ m}^3/\text{kg})/(20 \text{ m/s}) = 0.85 \text{ m}^2, d = (4A/\pi)^{1/2} = 1.04 \text{ m}$$

5.18^D 水蒸气以 250 lb_m/s 的流量流进一个管子. 在管子某个特定部位压强是 200 psia, 温度是 600°F. 如果要求在这个部位的流速达到 50 ft/s, 计算管子的直径(ft).

解 从连续性方程, $A = \dot{m}v/\bar{v}$. 从表 A3, $v = 3.058 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 因此,

$$A = (250 \text{ lb}_m/\text{s})(3.058 \text{ ft}^3/\text{lb}_m)/(50 \text{ ft/s}) = 15.29 \text{ ft}^2 \quad d = (4A/\pi)^{1/2} = 4.41 \text{ ft}$$

稳定流动的能量方程

5.19 一稳定流动流量为 \dot{m} , 根据下列守恒条件列方程: (a) 总能守恒; (b) 比能守恒; (c) 总功守恒; (d) 在比能守恒时给出与单位一致的守恒参数.

解 用 GPE 表示重力势能, 其他符号是它们通常所表示的意思. 可以得到

$$(a) \quad Q + W = \Delta H + \Delta KE + \Delta GPE$$

$$(b) \quad q - w = \Delta h + \Delta ke + \Delta gpe$$

$$(c) \quad Q + W = \dot{m}(\Delta h + \Delta ke + \Delta gpe)$$

(d) 根据牛顿第二定律, $F = (1/g_c)ma$, 可以得到

$$ke = \frac{v^2}{2g_c}, \quad gpe = \frac{gz}{g_c} \quad (z \equiv \text{高})$$

用国际单位制, 标准引力常数 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; 比能量的单位是 J/kg. 因此,

$$ke (\text{kJ/kg}) = \frac{[\bar{v}(\text{m/s})]^2}{2000}, \quad gpe (\text{kJ/kg}) = 0.00981[z(\text{m})]$$

用 USCS 单位制, $g = 32.174 \text{ ft/s}^2$; $g_c = 32.174 \text{ ft} \cdot \text{lb}_m/\text{lb}_f \cdot \text{s}^2$ (没有例外!); 比能量的单位是 $\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$. 因此,

$$ke (\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m) = \frac{[\bar{v}(\text{ft/sec})]^2}{64.348}, \quad gpe (\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m) = z(\text{ft})$$

或者, 由于 $1 \text{ Btu} = 778.16 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$, $(64.348)(778.16) \approx 50000$,

$$ke (\text{Btu/lb}_m) \approx \frac{[\bar{v}(\text{ft/sec})]^2}{50000}, \quad gpe (\text{Btu/lb}_m) = \frac{z(\text{ft})}{778.16}$$

5.20 在 $P-v$ 图上, 用阴影部分表明: (a) 理想气体稳定等温流动所做的功(流动功); (b) 理想气体等温膨胀所做的功(非流动功); (c) (a) 和 (b) 的结果有什么关系吗?

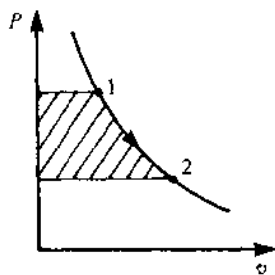


图 5-2

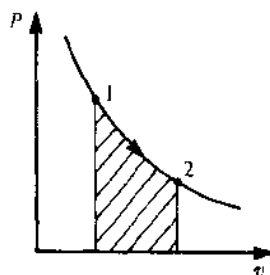


图 5-3

解 (a) $W_f = \int v dP$. 理想气体等温变化的 $P-v$ 图是双曲线, $|W_f|$ 由曲线和 P 轴之间的阴影面积给出. 见图 5-2.

(b) $W_{nf} = - \int P dv$. 理想气体等温变化的 $P-v$ 图是双曲线, $|W_{nf}|$ 由曲线和 v 轴之间的阴影面积给出. 见图 5-3.

(c) 令状态方程为 $Pv = \phi(T)$ [这包括理想气体的特殊情况]. 则对于等温过程, $Pdv + vdP = 0$, 或者 $dW_f = dW_{nf}$, 或者 $W_f = W_{nf}$.

亚音速喷管流动

- 5.21 (a)对喷管作为一个热力学装置使用作解释;(b)在下列条件下,稳定流动的能量方程的近似形式是怎样的[题 5.19(a)]?(i)非绝热喷管,(ii)绝热喷管;(c)哪种流体用绝热假定是合理的?(d)喷管流动有可能是可逆的吗?(e)在下列图中描绘典型的可逆(s)和不可逆或实际的(a)喷管膨胀(完全在过热区域)(i) $T-s$ 图,(ii) $h-s$ 图,(iii) $(\log P)-h$ 图.

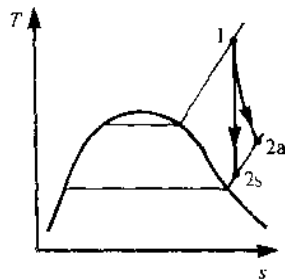


图 5-4

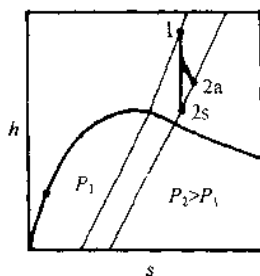


图 5-5

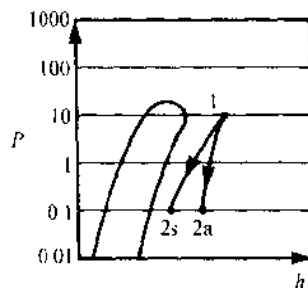


图 5-6

解 (a)通过减少焓使流体加速,——见(b)

(b)无轴功势能可忽略不计, $Q = \Delta H + \Delta KE$ 是非绝热流动的近似形式. 对于绝热流动, $Q = 0$, 方程变为 $\Delta H + \Delta KE = 0$.

(c)流动中只有少量的热传递而焓和动能增加占主导地位.

(d)任一实际过程都是不可逆的,比较实际喷管的效率的概念是有用的.

(e)(i)等压线在过热区沿右上-左下的方向. 对于可逆膨胀, $\Delta s = 0$, 对不可逆膨胀, $\Delta s > 0$, 因此路径分别是图 5-4 中的 $1 \rightarrow 2s$ 和 $1 \rightarrow 2a$.

(ii)可逆($1 \rightarrow 2s$)和不可逆($1 \rightarrow 2a$)过程的 $h-s$ 图(图 5-5)情况类上.

(iii)图 5-6 显示了 $(\log P)-h$ 图上两过程的普遍情形,仍有不可逆过程导致熵增.

- 5.22 证明对于稳定的各向同性流动,喷管横截面积一定满足 $dA/A = (\mu^2 - 1)(d\bar{v}/\bar{v})$, 式中 $\mu = \bar{v}/\bar{c}_1 =$ 流动的马赫数.

解 对连续性方程取对数后求导,得

$$\frac{dA}{A} + \frac{d\bar{v}}{\bar{v}} - \frac{d\bar{v}}{\bar{v}} = 0 \quad (1)$$

题 5.21(b)给出 $dh + d(ke) = 0$, 即

$$dh + \bar{v} d\bar{v} = 0 \quad (2)$$

各向同性, Tds 方程给出

$$dh - \bar{v} dp = 0 \quad (3)$$

定义 $\bar{v}_1^2 = (\partial p / \partial \rho)$, 得

$$\bar{v}_1^2 d\bar{v} + \bar{v}^2 dp = 0 \quad (4)$$

在式(2)、(3)、(4)中消去 dh 和 dp , 得

$$\frac{d\bar{v}}{\bar{v}} = \mu^2 \frac{d\bar{v}}{\bar{v}} \quad (5)$$

将式(5)代入式(1)即得所证.

- 5.23 参见题 5.22, 亚音速流体需要一个收缩喷管.

解 由于喷管让流体加速, $d\bar{v} > 0$. 这样, $\mu < 1$, 意味着 $dA < 0$.

- 5.24^D 空气以 0.5 kg/s 的速度进入绝热喷管. 入口处的状态是 2 bar , 50°C . 出口处压强为 1 bar , 速度是 250 m/s , 面积为 0.002 m^2 . 假设是理想气体, 计算出口处的温度($^\circ\text{C}$).

解 根据题 5.2(c),

$$T = \frac{A \bar{v} P}{\dot{m} R} = \frac{(0.002)(250)(100)}{(0.5)(0.28704)} = 348.4 \text{ K} = -75.2^\circ\text{C}$$

- 5.25^D 空气以 $1.25 \text{ lb}_m/\text{s}$ 的流速进入绝热喷管, 入口处的状态是 $25 \text{ psia}, 120^\circ\text{F}$. 出口处压强为 14.7 psia , 速度是 800 ft/s , 面积为 3.0 in^2 . 假设是理想气体, 计算出口处的温度 ($^\circ\text{F}$).

解 根据题 5.2(c),

$$T = \frac{A_2 P}{\dot{m} R} = \frac{(3.0)(800)(14.7)}{(1.25)(53.35)} = 529 \text{ R} = 69^\circ\text{F}$$

[注意 A 和 $P=F/A$ 的单位要一致.]

- 5.26 题 5.25 里的数据几乎只是将题 5.24 的数据转换成 USCS 制. 然而, 在题 5.25 里, 温度下降, 而在题 5.24 里温度增加. 哪里错了?

解 没有错误. 题 5.25 里的数据转换成更精确的国际单位制是: $\dot{m} = 0.567 \text{ kg/s}$, $P_1 = 1.7237 \text{ bar}$, $T_1 = 48.89^\circ\text{C}$, $P_2 = 1.0135 \text{ bar}$, $\bar{v}_2 = 243.84 \text{ m/s}$ (精确值), $A_2 = 0.001935 \text{ m}^2$. 这些数据给出了

$$T = \frac{(0.001935)(243.84)(101.35)}{(0.567)(0.28704)} = 294 \text{ K} (=70^\circ\text{F})$$

- 5.27^D 根据题 5.24 里的数据, 计算: (a) 比动能的变化 (kJ/kg); (b) 初始速度 (m/s). 比热是常数.

解 (a) 用方程 [题 5.21(b)] $\Delta h + \Delta ke = 0$. 如果比热为常数 $\Delta h = c_p \Delta T$, 这时, $50^\circ\text{C} = 323 \text{ K}$, $c_p = 1.006 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此, $\Delta h = (1.006)(50 - 75.2) = -25.35 \text{ kJ/kg}$.

(b) 根据题 5.19(d), $(250^2 - \bar{v}_1^2)/2000 = -25.35$, 解得 $\bar{v}_1 = 336.5 \text{ m/s}$.

- 5.28^D 根据题 5.25 里的数据, 计算: (a) 比动能的变化 (Btu/lb_m); (b) 初始速度 (ft/s). 比热是常数.

解 (a) 如果比热为常数, $\Delta h = c_p \Delta T$, 这时, $120^\circ\text{F} = 580 \text{ R}$, $c_p = 0.2405 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 因此,

$$\Delta ke = (0.2405)(120 - 69) = 12.3 \text{ Btu/lb}_m$$

(b) 根据题 5.19(d), $(800^2 - \bar{v}_1^2)/50000 = 12.3$; 或者 $\bar{v}_1 = 158 \text{ ft/s}$.

- 5.29^D 用空气表重解题 5.27.

解 当 $T_2 = 348.4 \text{ K}$ 时, $h_2 = 340.5 + (8.4/20)(360.6 - 340.5) = 348.9 \text{ kJ/kg}$; 当 $273.2 + 50 = 323.2 \text{ K}$ 时, $h_1 = 320.4 + (3.2/20)(340.5 - 320.4) = 323.6 \text{ kJ/kg}$. 因此, $(250^2 - \bar{v}_1^2)/2000 = 323.6 - 348.9$, 或者 $\bar{v}_1 = 336.3 \text{ m/s}$.

- 5.30^D 用空气表重解题 5.28.

解 在 529°R 时, $h_2 = 124.2 + (9/20)(129.1 - 124.2) = 126.4 \text{ Btu/lb}_m$; 在 $450 + 120 = 580^\circ\text{R}$ 时, $h_1 = 138.7 \text{ Btu/lb}_m$. 因此, $(800^2 - \bar{v}_1^2)/50000 = 138.7 - 126.4$, 或者 $\bar{v}_1 = 158 \text{ ft/s}$.

- 5.31^D 一个刚性的, 完全绝热的喷管里充有 $100 \text{ bar}, 600 \text{ K}$ 的水蒸气, 流速为 50 m/s . 管子入口面积是 0.001 m^2 . 如果管子排出的气体是 40 bar , 气液混合物的干度为 90% , 计算出口的速度 (m/s).

解 从题 5.21(b), $h_2 - h_1 + (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/2000 = 0$. 在 $40 \text{ bar}, 90\%$ 的干度时, $h_2 = (1 - x_2)h_{f2} + xh_{g2} = (1 - 0.9)(1087) + (0.9)(2801) = 2630 \text{ kJ/kg}$; 在 $100 \text{ bar}, 600 \text{ K}$ 时, $h_1 = 2820 \text{ kJ/kg}$. 这时, 由于 $\bar{v}_1 = 50 \text{ m/s}$, $\bar{v}_2^2 - 50^2 = (2000)(2820 - 2630) = 380000$, 因此, $\bar{v}_2 = 619 \text{ m/s}$.

- 5.32^D 一个刚性的, 完全绝热的喷管里充有 $1500 \text{ psia}, 600^\circ\text{F}$ 的水蒸气, 流速为 150 ft/sec . 管子入口面积是 0.0001 ft^2 . 如果管子排出的气体是 600 psia , 气液混合物的干度为 90% , 计算出口的速度 (ft/s).

解 根据题 5.21(b), 能量的单位用 Btu , $h_2 - h_1 + (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/50000 = 0$. 在 600 psia , 干度为 90% 时, $h_2 = (1 - x_2)h_{f2} + xh_{g2} = (1 - 0.9)9471.70 + 0.9 \cdot 90912040 = 1131 \text{ Btu/lb}_m$; 在 $1500 \text{ psia}, 600^\circ\text{F}$ 时, $h_1 = 1175 \text{ Btu/lb}_m$. 这时, 由于 $\bar{v}_1 = 150 \text{ ft/s}$, $(\bar{v}_2^2 - 150^2) = (50000)(1175 - 1131) = 2200000$, 因此, $\bar{v}_2 = 1491 \text{ ft/s}$.

- 5.33^D 对于题 5.31 里的喷管下列值应该是多少? (a) 出口处的面积 (m^2); (b) 质量流速 (kg/

s); (c) 入口和出口处体积流速(m^3/s).

解 (a) 从连续性方程可得 $A_2 = A_1(\bar{v}_1/\bar{v}_2)(v_2/v_1)$, $A_1 = 0.001\text{m}^2$, $\bar{v}_1 = 50\text{m/s}$, $\bar{v}_2 = 619\text{m/s}$, 从表 A.5 可以得到 $v_1 = 0.0201\text{m}^3/\text{kg}$, $v_2 = (1-x_2)v_{f2} + x_2v_{g2} = (1-0.9)(1.252 \times 10^{-4}) + (0.9)(0.0498) = 0.0449\text{m}^3/\text{kg}$. 因此, $A_2 = (0.001)(50/619)(0.0449/0.0201) = 1.804 \times 10^{-4}\text{m}^2$.

(b) $\dot{m} = A_1\bar{v}_1/v_1 = (0.001\text{m}^2)(50\text{m/s})/(0.0201\text{m}^3/\text{kg}) = 2.488\text{kg/s}$. 否则, $\dot{m} = A_2\bar{v}_2/v_2 = (1.804 \times 10^{-4})(619)/(0.0449) = 2.487\text{kg/s}$.

(c) $\dot{V}_1 = \dot{m}v_1 = (2.488\text{kg/s})(0.0201\text{m}^3/\text{kg}) = 0.050\text{m}^3/\text{s}$; $\dot{V}_2 = \dot{m}v_2 = (2.487\text{kg/s})(0.0449\text{m}^3/\text{kg}) = 0.112\text{m}^3/\text{s}$. 注意为了保持一致, 对于不同的比体积代入的 \dot{m} 值有小小的差别.

5.34^D 对于题 5.32 里的喷管, 下列值应该是多少? (a) 出口处的面积(ft^2); (b) 质量流速(lb_m/s); (c) 入口和出口处体积流速(ft^3/s).

解 (a) 从连续性方程可以得到

$$A_2 = A_1(\bar{v}_1/\bar{v}_2)(v_2/v_1), A_1 = 0.0001\text{ft}^2, \bar{v}_1 = 150\text{ft/s}, \bar{v}_2 = 1491\text{ft/s}$$

从表 A.3,

$$v_1 = (0.282\text{ft}^3/\text{lb}_m)$$

$$v_2 = (1-x_2)v_{f2} + x_2v_{g2} = (1-0.9)(0.0201) + (0.9)(0.770) = 0.695\text{ft}^3/\text{lb}_m$$

因此,

$$A_2 = (0.0001)(150/1491)(0.695/0.282) = 2.479 \times 10^{-5}\text{ft}^2$$

(b) $\dot{m} = A_1\bar{v}_1/v_1 = (0.0001\text{ft}^2)(150\text{ft/s})/(0.282\text{ft}^3/\text{lb}_m) = 0.0532\text{lb}_m/\text{s}$

或者, $\dot{m} = A_2\bar{v}_2/v_2 = (2.479 \times 10^{-5}\text{ft}^2)(1491\text{ft/s})/(0.695\text{ft}^3/\text{lb}_m) = 0.0532\text{lb}_m/\text{s}$

(c) $\dot{V}_1 = \dot{m}v_1 = (0.0532\text{lb}_m/\text{s})(0.282\text{ft}^3/\text{lb}_m) = 0.0150\text{ft}^3/\text{s}$

$$\dot{V}_2 = \dot{m}v_2 = (0.0532\text{lb}_m/\text{s})(0.695\text{ft}^3/\text{lb}_m) = 0.0370\text{ft}^3/\text{s}$$

5.35 当喷管等熵效率达到多少时才会让 5.31 题中提到的喷管排出气体(40bar)刚好是干饱和的?

解 等熵喷管效率定义为 $\eta = \Delta h_a/\Delta h_r$. 入口条件为 100bar, 600K, $s_1 = 5.775\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$. 40bar 时等熵排气, $s_2 = s_1 = 5.775\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$. s_2 的值小于饱和蒸汽的值, 所以 $s_{\text{max}} = (1-x_2)s_{f2} + x_2s_{g2} = (1-x_2)(2.797) + x_2(6.069)$, 因此, $x_2 = 2.978/3.272 = 0.910$. 在 40bar 压强, 干度为 91% 时,

$$h_{2s} = (1-x_2)h_{f2} + x_2h_{g2} = (1-0.910)(1087) + (0.910)(2801) = 2647\text{kJ/kg}$$

因此入口的焓是 $h_1 = 2820\text{kJ/kg}$, 那么 $\Delta h_r = h_{2s} - h_1 = 2647 - 2820 = -173\text{kJ/kg}$.

如果出口水蒸气压强是 40bar, 恰好是干饱和的, $h_{2a} = h_g(40\text{bar}) = 2801\text{kJ/kg}$; 因此, $\Delta h_a = h_{2a} - h_1 = 2801 - 2820 = -19\text{kJ/kg}$, $\eta = \Delta h_a/\Delta h_r = 19/173 = 0.110$, 或者 11%.

5.36^D 根据题 5.35, 可以发现一个装有 100bar, 600K, 速度为 50m/s 的水蒸气的完全绝热的喷管, 如果经过等熵过程, 在其出口处将得到压强为 40bar, 干度为 91% 的水蒸气, 讨论题 5.31 中声称获得的 90% 的干度.

解 因为 $\Delta s \geq q/T$, 那么, 对于完全绝热的喷管, $\Delta s \geq 0$. 等熵膨胀过程中 $\Delta s = 0$, 所以整个过程的路径是从点 1 到点 2s (图 5-7). 如果膨胀是不可逆过程, 将在点 2s 右边 40bar 的等压线上从点 1 到点 2. 这将导致干度高于 91%. 90% 的干度没办法获得.

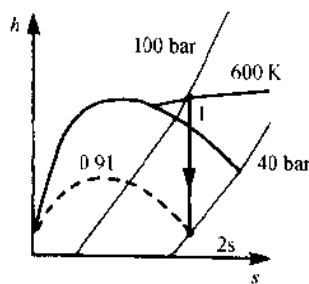


图 5-7

5.37 如果从 1500psia, 600°F 的状态开始做等熵膨胀, 当压强为 600psia 时喷管排出气体的质量是多少? 可以使用题 5.32, 5.34 里的任何数据.

解 在 1500psia, 600°F 时, $h_1 = 1175\text{Btu/lb}_m$, $s_1 = 1.342\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 对于等熵膨胀, 在 600psia 时, $s_2 = s_1 = 1.342\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 所以 $s_{\text{max}} = 1.342 = (1-x_2)s_{f2} + x_2s_{g2} = (1-x_2)(0.622) + x_2(1.485)$, 因此 $x_2 = 83.4\%$.

5.38^D 根据题 5.37, 可以发现, 一个装有 1500psia, 600°F, 流速为 150ft/s 的水蒸气的完全绝热的喷管, 如果经过等熵过程, 在其出口处将得到压强为 600psia, 干度为 83.4% 的水蒸气, 讨论题 5.32 中声称获得的 90% 的干度.

解 见图 5-8. 实际过程的终点 2a, 在等熵点 2s 的右边, 所以在喷管里流过时熵增加了. 如图

所示,不可逆过程是真实的,排出的蒸汽干度增加如图所示。

- 5.39^D 25bar, 600K 状态下 2kg/s 的水进入一个绝热的喷管, 速度为 100m/s. 出口的状态为 10bar, 500m/s, 求出口处水的物理状态. 根据饱和曲线在 P - v 图上画出这个过程曲线。

解 25bar 时, 饱和温度是 497.1K; 因此, 初始状态是过热的. 在入口处, $h_1 = 3075$ kJ/kg. 因此, 根据功的方程 $\Delta h + \Delta ke = 0$, $h_2 = h_1 + (v_1^2 - v_2^2)/2000 = 3075 + (100^2 - 500^2)/2000 = 2955$ kJ/kg. 出口处水的物理状态可以根据两个独立的热力学性质来确定——压强 10bar, 比焓, 2955 kJ/kg. 因为在 10bar 时, 饱和气体的焓是 2777 kJ/kg, 更大的值表明是过热状态. 这个过程如图 5-9 所示. 由于没有给出在出口和入口之间的条件, 确切的路径无法确定。

注意: 使用了具有比焓的功的方程, 没有必要知道流量。

- 5.40^D 质量为 5lb_m/s 的水物质在 300psia, 600°F 的状态下以 300ft/s 的速度进入绝热喷管, 根据出口处的状态 150psia, 1500ft/s, 求出口处水的物理状态. 根据饱和曲线在 P - v 图上画出这个过程曲线。

解 在 300psia 时, 饱和温度是 417.4°F; 因此, 初始状态是过热的. 在入口处 $h_1 = 1315$ Btu/lb_m. 因此, 根据功的方程 $\Delta h + \Delta ke = 0$, $h_2 = h_1 + (v_1^2 - v_2^2)/50000 = 1315 + (300^2 - 1500^2)/50000 = 1272$ Btu/lb_m. 出口处水的物理状态可以根据两个独立的热力学性质来确定——压强 150psia, 比焓 1272 Btu/lb_m. 因为在 150psia 时, 饱和气体的焓是 1195 Btu/lb_m, 更大的值表明是过热状态. 这个过程如图 5-9 所示. 由于没有给出在出口和入口之间的条件, 确切的路径无法确定。

注意: 使用了具有比焓的功的方程, 没有必要知道流量。

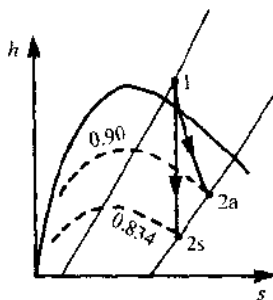


图 5-8

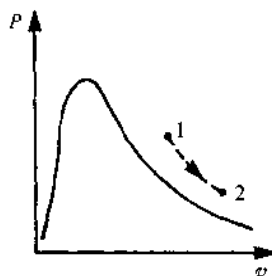


图 5-9

节流热量计

- 5.41 (a) 简单解释流体的节流过程; (b) 推导涉及这个过程的基本能量方程; (c) 什么是焦耳-汤姆孙 (或者焦耳-开尔文) 系数?

解 (a) 任一流体流动的过程都会有一个明显的降压. 例如节流孔, 汽化器, 旋塞和家庭供水用的水龙头等等. 节流热量计用来确定水蒸气的干度。

(b) 稳定流动的能量方程是 $Q + W = \Delta H + \Delta KE + \Delta GPE$. 假设在节流过程中热量的传递可以忽略, 动能和势能也可以忽略, 很明显没有功的相互作用. 因此基本的能量方程变成 $\Delta H = 0$, 这是节流过程的能量方程。

(c) 见题 4.119. 这一章中的系数能够从表列出的热力学数据中找到。

- 5.42 (a) 描述节流热量计. 为什么要使用节流热量计? (b) 在使用它时有什么实际困难?

解 (a) 为了求湿度较小的湿蒸汽混合物在压强 P_1 时的干度, 让水蒸气样品流过节流管或节流孔. 图 5-10 给出了带有节流孔 O 的水龙头, 用这个装置测量节流后的压强 (P_2) 和温度 (T_2). 压强 (P_1) 必须已知。

(b) 温度 T_2 至少要在饱和温度以上 5°C (9°F) 以避免可能出现的冷凝. 对于过热物质如果知道压强和温度, 就能得到焓. 如果出现冷凝, 两个参数就不再独立 (通过气体压强方程联系起来), 这种方法不再起作用. 如果湿度很大将会导致湿气被带入热量计, 通过数字的模糊可看出来。

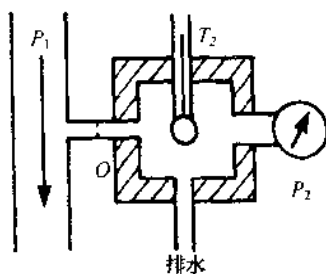


图 5-10

- 5.43^D 3bar 时的水蒸气进入节流热量计, 离开时变为 2bar, 400K 的过热水蒸气. 进入的水蒸气的干度是多少?

解 假设热量计中没有热量散失, 忽略动能的影响等等. 这个过程将是等焓的. 在热量计的出

11处为2bar, 400K, 表A5给出了 $h_2 = 2721.6 \text{ kJ/kg}$, 因此 $h_1 = 2721.6 \text{ kJ/kg}$. 根据3bar时的饱和数据可得到 $h_f = 561.5 \text{ kJ/kg}$, $h_g = 2726 \text{ kJ/kg}$, 因为 $h_f < h_1 < h_g$, 水蒸气是湿的. 解方程 $2721.6 = (1-x)(561.5) + x(2726)$, 得到 $x = 99.8\%$.

- 5.44^D 150psia时的水蒸气进入节流热量计, 离开时状态为300°F大气压下的过热水蒸气. 进入的水蒸气的干度是多少?

解 假设热量计中没有热量散失, 忽略动能的影响等等. 这个过程将是等焓的. 在热量计的出口处为14.7psia, 300°F, 表A3给出了 $h_2 = 1193 \text{ Btu/lbm}$, 因此在14.7psia时, $h_1 = 1193 \text{ Btu/lbm}$. 根据150psia时的饱和数据可得到 $h_f = 330.5 \text{ Btu/lbm}$, $h_g = 1194.5 \text{ Btu/lbm}$, 因为 $h_f < h_1 < h_g$, 水蒸气是湿的. 解方程 $1193 = (1-x)(330.5) + x(1194.5)$, 得到 $x = 99.8\%$.

分离和节流热量计

- 5.45 描述这个装置, 该装置比简单节流热量计有所改进.

解 一个分离器插在孔的前面, 热量计阻止水分进入. 见图5-11.

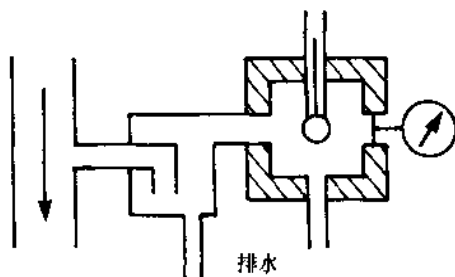


图5-11

- 5.46^D 一个设备包括分离器和热量计, 得到下面的数据: 主流压强, 15bar; 节流后的压强, 1.10bar; 节流后的温度为380K; 排出的流量为2.20kg/min; 分离器排水的流量为0.22kg/min. 主流水蒸气的湿度是多少?

解 令主流为 \dot{m}_0 , 从分离器中排去流体的质量流速为 \dot{m}_1 , 流过热量计的质量流速为 \dot{m}_2 ; 所以 $\dot{m}_0 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$. 如果 h_1 是从分离器中流出去的饱和液体的比焓, h_2 是通过热量计的过热水蒸气的比焓, 那么, 对于一个绝热的分离器和热量计系统, $\dot{m}_0 h_0 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$, 或 $h_0 = (\dot{m}_1/\dot{m}_0)h_1 + (\dot{m}_2/\dot{m}_0)h_2$. 因为 $\dot{m}_0 = 2.20 \text{ kg/min}$ 和 $\dot{m}_1 = 0.22 \text{ kg/min}$, 那么 $\dot{m}_2 = \dot{m}_0 - \dot{m}_1 = 1.98 \text{ kg/min}$. 表A5给出了 $h = (1\text{bar}, 380\text{K}) = 2690.0 \text{ kJ/kg}$, 在380K时是2687 kJ/kg, 这时 $P_x = 1.2869\text{bar}$. 因此, 在1.10bar时, $h_2 = 2690 + [(1.10 - 1.0)/(1.29 - 1.0)](2687 - 2690) = 2689 \text{ kJ/kg}$. 在分离器水管里, $h_1 = (15\text{bar}$ 时饱和液体的 $h) = 844.8 \text{ kJ/kg}$. 代入这些数据,

$$h_0 = \left(\frac{0.22}{2.20}\right)(844.8) + \left(\frac{1.98}{2.20}\right)(2689) = 2505 \text{ kJ/kg}$$

主流的湿度 y_0 由下面式子给出 $2505 = (y_0)(845) + (1 - y_0)(2791)$, 或者 $y_0 = 14.7\%$.

- 5.47^D 你能计算出题5.46中进入热量计的水蒸气的真实湿度是多少吗?

解 因为水蒸气被节流, 在热量计出口处主流水蒸气的比焓是2689 kJ/kg, 那么 $h_2 = (1-x)h_{f,2} + xh_{g,2}$, 这里 c 指热量计的入口. 入口的压强是15bar, 所以 $2689 = (y)(845) + (1-y)(2791)$, 或者 $y \approx 5\%$.

- 5.48^D 在一个分离器和节流热量计里, 观察得到下面的数据: 主流压强, 200psia; 节流后的压强, 20psia; 节流后的温度, 230°F; 排出的流量5lb_m/min; 分离器排水的流量为0.5lb_m/min; 主流水蒸气的湿度是多少?

解 令主流为 \dot{m}_0 , 从分离器中排除去流体的质量为 \dot{m}_1 , 流过热量计的质量流速为 \dot{m}_2 ; 所以 $\dot{m}_0 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$. 如果 h_1 是从分离器中流出去的饱和液体的比焓, h_2 是通过热量计的过热水蒸气的比焓, 那么, 对于一个绝热的分离器和热量计系统, $\dot{m}_0 h_0 = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2$, 或 $h_0 = (\dot{m}_1/\dot{m}_0)h_1 + (\dot{m}_2/\dot{m}_0)h_2$. 因

为 $\dot{m}_0 = 5 \text{ lb}_m/\text{min}$ 和 $\dot{m}_1 = 0.5 \text{ lb}_m/\text{min}$, 那么 $\dot{m}_2 = \dot{m}_0 - \dot{m}_1 = 4.5 \text{ lb}_m/\text{min}$. 表 A3 给出了 h_2 (20psia, 228°F) = 1156 Btu/lb_m, h (20psia, 250°F) = 1167 Btu/lb_m. 因此, 在 20psia, 230°F 时, $h_2 = 1156 + [(230 - 228)/(250 - 228)](1167 - 1156) = 1157 \text{ Btu/lb}_m$. 在分离器水管里, h_1 (20psia 时饱和液体的 h) = 196.3 Btu/lb_m. 代入这些数据,

$$h_0 = \left(\frac{0.5}{5.0}\right)(196.3) + \left(\frac{4.5}{5.0}\right)(1157) = 1061 \text{ Btu/lb}_m$$

主流的湿度 y_0 由下面式子给出 $1061 = (y_0)(355.5) + (1 - y_0)(1198.8)$, 或者 $y_0 \approx 16\%$.

5.49^D 你能计算出题 5.48 中进入热量计的水蒸气的真实湿度吗?

解 因为水蒸气被节流, 在热量计出口处主流水蒸气的比焓是 1157 Btu/lb_m, 那么 $h_2 = (1 - x)h_{2f} + xh_{2g}$, 这里 x 指热量计的入口. 入口的压强是 200psia, 所以 $1157 = (y)(355.5) + (1 - y)(1198.8)$, 因此 $y \approx 5\%$.

在题 5.50~5.61 中选择最佳答案

5.50 理想气体通过绝热管节流, 出口压强低于入口压强. 出口处的温度比入口处的温度: (a) 高; (b) 相等; (c) 低; (d) 不能确定.

解 对于理想气体, 等焓意味着温度是常数. 选(b).

5.51 真实气体通过绝热管节流, 出口压强低于入口压强. 出口处的温度比入口处的温度: (a) 高; (b) 相等; (c) 低; (d) 不能确定.

解 焦耳-汤姆孙系数的表达式为, $\mu = (\partial T / \partial P)_h$, 是不确定的. 选(d).

5.52 空气从高压到低压进行绝热节流. 此过程是: (a) 可逆的; (b) 不可逆的; (c) 有时可逆, 有时不可逆.

解 从 Tds 方程, $ds = -(v/T)dP > 0$. 选(b).

5.53 在一个节流装置中沿流动方向焓: (a) 减小; (b) 不变; (c) 增加.

解 $Q = \Delta H$; 如果装置是完全绝热的选(b).

5.54 根据热力学第二定律, 当理想气体被节流时, 温度改变: (a) 可以忽略; (b) 为零; (c) 是正的; (d) 可以是任意值.

解 选(b), 和题 5.50 一样.

5.55 一理想气体通过刚性的水平放置的直径是常数的管子. 动能不可忽略. 气体的温度不变, 但是出口处(2)的压强低于入口处(1)的压强. 热流是: (a) 流入周围环境; (b) 为零; (c) 流出周围环境.

解 根据题 5.2(c), $v_2 > v_1$. 常温下的理想气体焓是一个常数; 因此热流的能量方程是 [题 5.19 (b)] $q = \Delta ke = \frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) > 0$. 选(c).

5.56 一真实气体被节流. 温度的改变是: (a) 可以忽略; (b) 为零; (c) 正的; (d) 任何值; (e) 不能确定.

解 选(d); 节流不能认为是绝热的.

5.57^D 空气从 5bar 和 350K 绝热节流到 1bar. 如果空气的 $R = 0.28704 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 空气的熵的变化是 (kJ/kg · K): (a) 0; (b) 0.462; (c) 0.6798; (d) 2.165.

解 根据题 5.52, $ds = -(v/T)dP = -(R/P)dP$, 或者 $\Delta s = R \ln(P_1/P_2) = (0.28704) \ln 5 = 0.462 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 选(b).

5.58 空气从 20psia, 80°F 绝热节流到 15psia. 空气的熵: (a) 减小; (b) 不变; (c) 增加.

解 选(c) (节流是不可逆过程).

5.59^D 空气从 30psia, 100°F 绝热节流到 15psia. 如果空气的 $R = 0.0686 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 空气的熵的变化是 (Btu/lb_m · °R): (a) -0.0475; (b) 0; (c) 0.0475; (d) 0.0686; (e) 0.1161.

解 根据题 5.52, $ds = -(v/T)dP - (R/P)dP$, 或者 $\Delta s = R \ln(P_1/P_2) = (0.0686) \ln 2 = 0.0475 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 选(c).

- 5.60^D 制冷剂 R12 慢慢流过一个刚性绝热的水平通道, 通道中有摩擦力存在. 在入口处, $P = 10 \text{ bar}$, $T = 350 \text{ K}$. 如果出口处的压强是 1.5 bar , 出口处的温度大约是: (a) 46°C ; (b) 51°C ; (c) 64°C ; (d) 77°C .

解 在入口处, 根据表 C6, $h = 595.0 \text{ kJ/kg}$. 由于过程是等焓的(缓慢流动=摩擦力的功很小), $h_2 = h_1 = 595.0 \text{ kJ/kg}$. 当 $P_2 = 1.5 \text{ bar}$ 时, $T_2 = 330 + [(595.0 - 590.6)/(596.8 - 590.6)](340 - 330) = 337.1 \text{ K} = 63.9^\circ\text{C}$. 选(c).

- 5.61^D 制冷剂 R12 慢慢流过一个刚性绝热的水平通道, 通道中有摩擦力存在. 在入口处, $P = 150 \text{ psia}$, $T = 140^\circ\text{F}$. 如果出口处的压强是 15 psia , 出口处的温度大约是: (a) 104°F ; (b) 108°F ; (c) 124°F ; (d) 140°F .

解 在入口处, 根据表 C5, $h = 93.50 \text{ Btu/lb}_m$. 由于过程是等焓的(缓慢流动=摩擦力的功很小), $h_2 = h_1 = 93.50 \text{ Btu/lb}_m$. 当 $P_2 = 15 \text{ psia}$ 时, $T_2 = 100 + [(93.50 - 92.36)/(95.37 - 92.36)](120 - 100) = 107.6^\circ\text{F}$. 选(b).

- 5.62^D 在 2 bar , 300 K 时, 通过节流, 气体 R12 的温度可以升高多少或者降低多少(K/bar)? 假设忽略热传递.

解 流体速度没给定, 在已知条件下, $\Delta h = 0$, $h = 570.8 \text{ kJ/kg}$. 选择焓值与此 h 相同的压强和温度, 计算 ΔT , ΔP . 在 310 K 时, 相同的焓值将出现在 $6 + [(570.8 - 571.7)/(8 - 6)] = 6.58 \text{ bar}$. 因此, $\mu = (\Delta T/\Delta P)_h = (310 - 300)/(6.58 - 2) = 2.18 \text{ K/bar}$. 因此 μ 是正的并且 ΔP 一定是负的, ΔT 也一定是负的, 所以它的效果是一种冷却.

- 5.63^D 在 40 psia , 90°F 时, 通过节流, 气体 R12 的温度可以升高多少或者降低多少($^\circ\text{F}/\text{psia}$)? 假设忽略热传递.

解 在这些条件下, 流体速度没给出, $\Delta h = 0$. 当焓和所求的焓值相同时, 选择压强和温度, 使焓值与已知条件下的焓值相同, 估算 ΔT , ΔP . 因为, 在 40 psia , 90°F 时, $h = (88.28 + 91.37)/2 = 89.83 \text{ Btu/lb}_m$ (40 psia 时 80°F 和 100°F 的平均值). 在 150 psia , 120°F 时表中列出的值几乎一样, $h = 89.80 \text{ Btu/lb}_m$. 因此, $\mu = (\Delta T/\Delta P)_h = (120 - 90)/(150 - 40) = 0.273^\circ\text{F/psia}$. 根据 h 随 P 在 80°F 附近的变化, 我们还可以估计在 5 psia , 80°F 时 $h \approx 89.82 \text{ Btu/lb}_m$; 这将可以得出 $\mu = 0.286^\circ\text{F/psia}$. 一个平均值是 $(0.28 \pm 0.01)^\circ\text{F/psia}$. 因为 P 的变化一定是负的, μ 是正的, 温度的改变必然是负的.

- 5.64^D 在 200 bar , 650 K 时, 水蒸气通过绝热节流膨胀到 0.25 bar . 求最后的温度(K)和膨胀之后水蒸气的物理状态.

解 数据——或者即使缺少这个数据——都允许作等焓的假设. 在入口的条件下, $h_1 = 2618 \text{ kJ/kg}$. 这本书里没有 0.25 bar 时过热蒸汽的表格, 但是对 1 bar 时表格的检验证明如果产物是气体, 只有在低于 380 K 时, 焓值才有可能为 2618 kJ/kg . 0.25 bar 时的饱和蒸汽的表格列出了 $h_f = 272.0$, $h_g = 2617 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 所以我们最有可能做的就是认为最后的状态是过热的, 温度高于 0.25 bar 时的饱和状态下的值 338.1 K .

- 5.65^D 在 3000 psia , 700°F 时, 水蒸气通过绝热节流膨胀到 5 psia . 求最后的温度($^\circ\text{F}$)和膨胀之后水蒸气的物理状态.

解 数据——或者即使缺少这个数据——都允许作等焓的假设. 在入口的条件下, $h_1 = 1059 \text{ Btu/lb}_m$. 查表 A3 证明如果产物是气体状态, 只有在 150 和 200°F 时, 焓的值才有可能为 1059 Btu/lb_m , 而且值必然在 h_f 为 130.2 Btu/lb_m 和 h_g 为 1131 Btu/lb_m 之间. 因此最后的温度和 5 psia 时的饱和状态相对应, 为 162.2°F . 物理状态是气液混合物.

- 5.66 将水蒸气节流获得饱和气体或气液混合物的最小温度(K)和压强(bar)是多少?

解 对于饱和气体, 图 5-2 中的点 2 代表极限条件, 从高压点 1 膨胀将在这一点和饱和气体的边界相切, 点 2 出现在压强大约为 30 bar 的地方, 所以这代表了产生饱和气体的最小压强. 我们可以认为相应的温度(大约 507 K)代表最小的温度. 如果获得的仅仅是饱和气体, 这种想法是正

确的.但在曲线左边的任何一点3将获得混合物,甚至是压强低于30bar的混合物.

- 5.67 2500psia, 700°F的水蒸气被节流从而获得饱和气体.会冷却多少(°F)?

解 此过程是等焓过程.在入口条件下, $h_1 = 1177 \text{ Btu/lb}_m$; 因此出口处的状态是比焓为 1177 Btu/lb_m 的饱和气体.考虑饱和水蒸气的 h_g 的值会发现两个结果都有可能: $P_2 \approx 60$ 或者 1400 psia (从表 A3), 而 $T_2 \approx 291$ 或者 679°F (从表 A1). 因此可能的冷却是 $291 - 700 = -409^\circ\text{F}$ 和 $679 - 700 = -21^\circ\text{F}$.

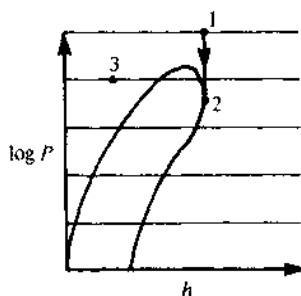


图 5-12

- 5.68 一种物质从一个适度的高压和某个温度经过绝热节流到一个低压.动能的改变可以被忽略.下列情况下温度改变怎样? (a)理想气体; (b)水蒸气或者 R12 气体; (c)不可压缩液体.

解 (a)对于理想气体,焓是温度的严格的增函数.因此,如果焓的变化为零,温度的变化也是零.

(b)对于水蒸气或者 R12,典型的 $(\log P)-h$ 图如图 5-13 所示.因为当焓不变时节流意味着压强的减少,从图上的任何一点垂直向下移动将导致温度的降低. (c)对于不可压缩流体的等焓过程, $0 = \Delta h = \Delta u + \Delta(vP) = \Delta u + v\Delta P = c\Delta T + v\Delta P$. ΔP 一定是负的,而 c, v 是正的,因此, $\Delta T > 0$.

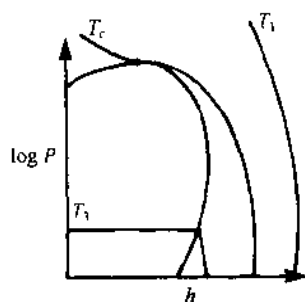


图 5-13

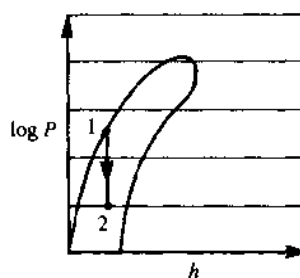


图 5-14

- 5.69 题 5.68(c)中得出不可压缩流体的节流会导致温度的升高.但是根据图 5-14,明显说明了如果对饱和液体节流,初始状态为点 1,终止状态 2 是更低的温度下的气液混合物.对此做出解释.

解 图 5-14 代表了真实流体 R12 和水物质,它能以饱和液体,饱和气体等状态存在.不可压缩液体的结果受到理想流体的约束.

- 5.70^D 饱和液体水从 50bar 被绝热节流到 5bar.最后的状态是什么?

解 对于一个节流过程, $\Delta h = 0$. 在最后的条件下, $h_1 = 1154 \text{ kJ/kg} = h_2$; 在 5bar 时, $h_f = 640 \text{ kJ/kg}$, $h_g = 2748 \text{ kJ/kg}$. 这样 $h_f < h_2 < h_g$, 所以水物质必然是气液混合物.

- 5.71^D 饱和液体水从 500°F 被绝热节流到 300°F.最后的状态是什么?

解 对于一个节流过程, $\Delta h = 0$. 在最后的条件下, $h_1 = 487.8 \text{ Btu/lb}_m = h_2$; 在 300°F 时, $h_f = 269.7 \text{ Btu/lb}_m$, $h_g = 1180 \text{ Btu/lb}_m$. 这样 $h_f < h_2 < h_g$, 所以水物质必然是气液混合物.

不可压缩流体

- 5.72 分析不可压缩流体,概括经常用到的一些性质.

解 (i) $v = v(T)$, 因此 $(\partial v / \partial P)_T = 0$; (ii) $u = u(T)$, 因此 $(\partial u / \partial P)_T = (\partial u / \partial v)_T = 0$; (iii) $\Delta h = c\Delta T + v\Delta P$; (iv) $s = s(T)$, $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$; (v) $c_p \approx c_v \approx c$.

- 5.73 从稳定流动能量方程推导伯努利方程.概括伯努利方程成立的条件.

解 稳定流动的能量方程是 $q + w = \Delta h + \Delta ke + \Delta gpe$. 假设是绝热流动, $q = 0$. 由于流体受重力影响,没有做功装置(推进器,叶轮等), $w = 0$. 对于等温流动或等熵流动(见题 5.72) $\Delta T = 0$, 所以 $\Delta h =$

$v\Delta P$, 将这些结果代入稳定流体的能量方程, $v\Delta P + \Delta ke + \Delta gpe = 0$. 代入 $\Delta P = P_2 - P_1$, $\Delta ke = (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/2g$, $\Delta gpe = (g/g_c)(z_2 - z_1)$, $\rho = 1/v$, 可以得到 $(P_2 - P_1)/\rho + (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/2g_c + (g/g_c)(z_2 - z_1) = 0$, 这就是所求的结果.

成立的条件是稳定流动, 流体不可压缩, 而且流动是等温或等熵的.

- 5.74 饱和液体 R12 在 1bar 的压强下密度为 1488 kg/m^3 . 要在流动过程中将其压缩到压强为 10bar, 所需要的最小功是多少?

解 最小功是对等熵压缩而言, 这时 $q = T\Delta s = 0$. Δke 和 Δpe 均为零, 那么稳定流动能量方程变为 $w = \Delta h = v\Delta P$. 所以,

$$v = 1/\rho = 6.72 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3, \quad \Delta P = 10 - 1 = 9 \text{ bar} = 900 \text{ kN/m}^2$$

因此,

$$w = (6.72 \times 10^{-4})(900) = 0.606 \text{ kJ/kg}$$

- 5.75 饱和液体 R12 在 1bar 时被发现需要 1 kJ/kg 的泵功将其压缩到 10bar. 求泵的等熵效率.

解 根据题 5.74 的结果, 等熵效率为 $\eta = w_s/w_m = 0.606/1 = 60.6\%$.

- 5.76^D 液体水初始状态为 1.1bar, 375K, 密度为 956.6 kg/m^3 , 被一个可逆泵压缩到 100bar. 求泵的功(kJ/kg).

解 由于不可压缩,

$$w_s = \int v dP = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{(100 - 1.1) \times 10^5}{956.6} = 10.3 \text{ kJ/kg}$$

- 5.77^D 液体水初始状态为 15psia, 212°F, 密度为 $59.81 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$, 被一个可逆泵压缩到 1500psia. 求泵的功(Btu/lb_m).

解 由于不可压缩,

$$w_s = \int v dP = \frac{\Delta P}{\rho} = \frac{(1500 - 15)(144/778.16)}{59.81} = 4.59 \text{ Btu/lb}_m$$

- 5.78^D 液体水初始状态为 1.1bar, 375K, 被效率为 81% 的水泵压缩到 100bar. 求泵的功(kJ/kg).

解 根据题 5.76, $w_m = 10.3/0.81 = 12.7 \text{ kJ/kg}$.

- 5.79^D 液体水初始状态为 15psia, 212°F, 被效率为 79% 的水泵压缩到 1500psia, 求泵的功(Btu/lb_m).

解 根据题 5.77, $w_m = 4.59/0.79 = 5.81 \text{ Btu/lb}_m$.

- 5.80^D 已知将初始状态为 1.1bar, 375K 的液态水压缩到 100bar 需要 13.5 kJ/kg 的能量, 求泵的等熵效率(%).

解 根据题 5.76, $\eta = 10.3/13.5 = 76.3\%$.

- 5.81^D 已知将初始状态为 15psia, 212°F 的液态水压缩到 1500psia 需要 6 Btu/lb_m 的能量, 求压缩机的等熵效率是多少(%)?

解 根据题 5.77, $\eta = 4.59/6 = 76.5\%$.

- 5.82 15°C 的水从海拔 2000m 的水库落入一个水轮机(高度未知). 水轮机入口处的压强是 52bar, 速度为 200m/s; 在水轮机出口处的压强是 1.9bar, 速度为 5m/s. 如果要得到 100 千瓦的输出功率, 求水流量. 假设水轮机内部没有热传递并且水是不可压缩的.

解 将稳流功率方程[题 5.19(c)]应用于水轮机的入口和出口间, $Q = 0$, Δgpe 近似为 0, 并且(对于不可压缩的绝热水流) $\Delta h = v\Delta P$. 因此, $\dot{W} = \dot{m}(v\Delta P + \Delta ke)$. 现在, 在 15°C 即 288K 时, 由表 A2 可查得 $v_f \approx 1.001 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$; 因此, $v\Delta P = (1.001 \times 10^{-3})(190 - 5200) = -5.02 \text{ kJ/kg}$. 另外, 当速度单位为 m/s 时, $\Delta ke = (5^2 - 200^2)/200 = -19.99 \text{ kJ/kg}$. 求得 $\dot{W} = -1000 \text{ kJ/s}$. 因此,

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}}{v\Delta P + \Delta ke} = \frac{-1000}{-5.02 - 19.99} = 40 \text{ kg/s}$$

- 5.83 已知位于楼顶的一个消防栓距地面 500ft. 供水系统从低于地面 25ft 的水箱中抽水, 通过管道, 和消防栓相连. 假设水温为 60°F, 并且水不可压缩, 忽略所有的摩擦与热传递, 如果要以 40ft/s 的速度将 100lb_m/s 的水流泵出消防栓, 问需要多大的功率?

解 题 5.19(c) 给出了这种情况的功率方程

$$\dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta ke + \Delta gpe) = \dot{m} \left[0 + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{64.348} + (z_2 - z_1) \right]$$

这里 $\Delta h = c\Delta T + v\Delta P = 0$, 因为, $\Delta T = \Delta P = 0$ (各个平面上的压强均为大气压强); 并且, 可以取 $\bar{v}_1 = 0$. 结果为: $\dot{W} = 100[(40^2/64.348) - 525] \approx 55000 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{s} = 100 \text{ hp}$.

- 5.84 通过一水力发电水轮机的流量为 25m³/s. 在水轮机的进水口, 水的压强为 5bar 温度为 25°C, 相对高度已知大于 100m, 流速为 1m/s. 在水轮机的出水口, 水的压强为 1.2bar 温度为 25.1°C, 相对高度为 0, 流速为 11m/s. 每 1kg 的水流过水轮机, 将损失 5J 的热量. 假设水是不可压缩的, 单位热量为 4.178kJ/kg · K, 计算: (a) 势能的变化量(kJ/kg); (b) 动能的变化量(kJ/kg); (c) 内能的变化量(kJ/kg); (d) 输出功率(MW).

解 (a) 根据题 5.19(d), $\Delta gpe = 0.00981(0 - 100) = -0.981 \text{ kJ/kg}$.

(b) 根据题 5.19(d), $\Delta ke = (11^2 - 1^2)/2000 = 0.60 \text{ kJ/kg}$.

(c) $\Delta u = c\Delta T = (4.178)(25.1 - 25) = 0.418 \text{ kJ/kg}$.

(d) 功率方程是 $\dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta ke + \Delta gpe - q)$. 可知

$$\Delta h = \Delta u + v\Delta P = (0.418 \text{ kJ/kg}) + (1.003 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})[(120 - 500) \text{ kN/m}^2] = 0.037 \text{ kJ/kg}$$

又有, $\dot{m} = \dot{V}/v = 25/(1.003 \times 10^{-3}) = 24925 \text{ kg/s}$. 已知 $q = -0.005 \text{ kJ/kg}$. 因此,

$$\dot{W} = (24925)(0.037 + 0.060 - 0.981 + 0.005) = -21909 \text{ kW} = -21.9 \text{ MW} \text{ (负号代表输出)}$$

- 5.85 把 14.7psia, 50°F 的水从低于地面的水箱中以 25lb_m/s 的流量抽出, 水面低于表面 11ft, 如果管子的直径为 3in, 求需要的功率. 忽略热传导, 并且假定水是不可压缩的.

解 根据题 5.83, $\dot{W} = \dot{m}[(\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/64.348 + (z_2 - z_1)]$. 而现在 $\bar{v}_2 = \bar{v}_1$ (根据连续方程),

因此,

$$\dot{W} = 25[0 - (-11)] = 275 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{s} = 0.5 \text{ hp}$$

- 5.86 一个露天的水箱装有深度为 z 的水. 水箱的底部产生了一个漏洞, 如果漏洞的横截面积为 A , 求下述表达式: (a) 水从水箱中漏出的速度; (b) 体积流量. 水槽是绝热的.

解 (a) 在上表面(1)与漏洞(2)之间应用伯努利方程(题 5.73)

$$\frac{P_{\text{atm}} - P_{\text{atm}}}{\rho} + \frac{\bar{v}_1^2 - 0^2}{2g_c} + \frac{g(0 - z)}{g_c} = 0$$

即

$$\bar{v}_2 = \sqrt{2gz}$$

(b)

$$\dot{V} = A\bar{v}_2 = \sqrt{2gz}$$

- 5.87 露天的水箱中装有 10in 深的水, 通过操作阀门控制装在水箱底部的直径为 3/4in 的管道进行排水. 当阀门打开时, 计算: (a) 流出速度(ft/s); (b) 体积流量(ft³/s).

解 根据题 5.86 的结果,

$$(a) \quad \bar{v}_2 = \sqrt{2gz} = [2(32.17)(10/12)]^{1/2} = 7.32 \text{ ft/s}$$

$$(b) \quad \dot{V} = A\bar{v}_2 = (\pi/4)(1/16)^2(7.32) = 0.0224 \text{ ft}^3/\text{s}$$

- 5.88^D 275K 的饱和 R12 液体以 20m/s 的速度进入 7mm 直径的管道. 通过管道发生热传递, 结果, R12 流出管道时的比体积为 0.016m³/kg, 温度为 275K. 求: (a) R12 流出管道时的状态(和干度); (b) R12 的流出速度(m/s); (c) 通过管道的传热功率(kW).

解 (a) 根据表 C2, 在 275K 时, $v_f = 0.0007197 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_g = 0.0545 \text{ m}^3/\text{kg}$. 因此 0.016m³/kg 的比体积代表气液混合物, 由 $v_{\text{mix}} = 0.016 = (1 - x_2)(0.00072) + x_2(0.0545)$, 可以求得干度为 $x_2 = 28.4\%$.

(b) 由连续性方程, $\bar{v}_2 = \bar{v}_1(v_2/v_1) = (20 \text{ m/s})(0.016/0.00072) = 444.4 \text{ m/s}$.

(c) 利用功的方程.

$$\begin{aligned}
 q &= \Delta h + \Delta ke - h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2000} \\
 &= [(1-0.284)(401.8) + (0.284)(552.9)] - 401.8 + \frac{444.4^2 - 20^2}{2000} \\
 &= 141 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

流量为 $\dot{m} = (\pi/4)d^2(\bar{v}_2/v_2) = (\pi/4)(7 \times 10^{-3})^2(444.4/0.016) = 1.069 \text{ kg/s}$, 因此,

$$\dot{Q} = \dot{m}q = (1.069 \text{ kg/s})(141.4 \text{ kJ/kg}) = 151.2 \text{ kW}$$

- 5.89^D 0°F 的饱和 R12 液体以 60 ft/s 的速度进入 2.22 in 直径的管道. 通过管道发生热传递, 结果, R12 流出管道时的比体积为 1 ft³/lb_m, 温度为 -10°F. 求: (a) R12 流出管道时的状态 (和干度); (b) R12 的流出速度 (ft/s); (c) 通过管道的传热功率 (Btu/s).

解 由表 C1, 在 -10°F 时, 饱和液态制冷剂 R12 的比体积为 0.01091 ft³/lb_m, 饱和气态的比体积为 1.973 ft³/lb_m, 1 ft³/lb_m 的比体积必然代表了气-液混合状态. 可以由下式求得干度:

$$v_{\text{mix}} = 1.000 = (1-x_2)(0.01091) + x_2(1.973), x_2 = 50.2\%$$

(b) 由连续性方程, 有

$$v_2 = v_1(v_2/v_1) = (60 \text{ ft/s})(1.000/1.609) = 37.3 \text{ ft/s}$$

(c) 运用功的方程, 有

$$\begin{aligned}
 q &= \Delta h + \Delta ke - h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{50000} \\
 &= [(1-0.502)(6.37) + (0.502)(76.20)] - 77.27 + \frac{37.3^2 - 60^2}{50000} \\
 &= -35.9 \text{ Btu/lb}_m
 \end{aligned}$$

流量为

$$\dot{m} = (\pi/4)d^2(\bar{v}_2/v_2) = (\pi/4)(2.22/12)^2(37.3/1) = 1.003 \text{ lb}_m/\text{s}$$

因此,

$$\dot{Q} = \dot{m}q = (1.003 \text{ lb}_m/\text{s})(-35.9 \text{ Btu/lb}_m) = -36.0 \text{ Btu/s}$$

亚音速扩散管

- 5.90 根据扩散管中亚音速流动的情况来解释方程 (题 5.22)

$$dA/A = (M^2 - 1)(d\bar{v}/\bar{v})$$

解 扩散管的作用是使液体减速同时增加它的压力; 它是一个反向的喷管. 如果速度降低, 那么 $d < 0$; 对亚音速的流动, $M < 1$. 因此, $dA > 0$, 亚声速的扩散管在流动的方向上产生扩散.

- 5.91^D 涡轮机引擎入口处的扩压器被设计用来使高速气流绝热减速, 增加压强. 扩压器入口处的压强为 0.75 bar, 温度为 275 K, 空气速度为 200 m/s. 如果要使排出气体的速度为 3 m/s, 计算: (a) 排出气体的压强 (bar); (b) 扩压器出口面积和入口面积的比值. 假定空气为理想气体.

解 (a) 在国际单位制下, 功的方程写成

$$(h_2 - h_1) + (v_2^2 - v_1^2)/2000 = c_p(T_2 - T_1) + (v_2^2 - v_1^2)/2000 = 0$$

代入 $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (由表 B2) 及 v_1, v_2, T_1 值, 得 $T_2 = 294.9 \text{ K}$. 运用等熵公式, $P_2 = P_1(T_2/T_1)^{k/(k-1)}$, $k = 1.4$, 得 $P_2 = (0.75)(294.4/275.0)^{1.4/0.4} = 0.952 \text{ bar}$.

(b) 由题 5.2(c),

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\bar{v}_1 P_1 T_2}{\bar{v}_2 P_2 T_1} = \frac{200 \cdot 0.75 \cdot 294.9}{3 \cdot 0.952 \cdot 275} = 56.3$$

- 5.92^D 用空气表重解题 5.91.

解 (a) 由表 B2, $h_1 = 275.1 \text{ kJ/kg}$. 把此值和流速值代入下式:

$$(h_2 - h_1) + (v_2^2 - v_1^2)/2000 = 0$$

求得 $h_2 = 295.1 \text{ kJ/kg}$, 相应的, $P_2 = 2.320$. 由等熵关系, $P_2 = P_1(P_2/P_1)$, 即 $2.320 = (1.816)(P_2/0.75)$, 即 $P_2 = 0.958 \text{ bar}$.

(b) 由连续性方程,

$$A_2/A_1 = (\bar{v}_1/\bar{v}_2)(v_2/v_1)$$

查表 B2, 得 $v = (1\text{bar}, 295\text{K}) = 0.846\text{m}^3/\text{kg}$; 应用 $P-v$ 乘积, 当 0.958bar 时, 得 $v_2 = 0.884\text{m}^3/\text{kg}$. 同理, $v_1 = 1.053\text{m}^3/\text{kg}$. 因此,

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{2000 \cdot 0.884}{3 \cdot 1.053} = 56.0$$

- 5.93^D 涡轮机引擎入口处的扩压器被设计用来使高速气流绝热减速, 增加它的压强. 扩压器入口处的压强为 10psia , 温度为 0°F , 空气速度为 600ft/s . 如果要使排出气体的速度为 7.5ft/s , 计算: (a) 排出气体的压强 (psia); (b) 扩压器出口面积和入口面积的比值. 假定空气为理想气体.

解 5.93 (a) 能量单位取 Btu, 功的方程为

$$(h_2 - h_1) + (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/50000 = c_p(T_2 - T_1) + (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/50000 = 0$$

代入 $c_p = 0.2402\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ (由表 B1) 及温度速度值, 得 $T_2 = 30^\circ\text{F}$. 运用等熵公式, $P_2 = P_1 (T_2/T_1)^{k/(k-1)}$, $k = 1.4$, 得 $P_2 = 10(490/460)^{1.72} = 12.5\text{psia}$.

(b) 由题 5.2(c),

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\bar{v}_1 P_1 T_2}{\bar{v}_2 P_2 T_1} = \frac{600 \cdot 10 \cdot 490}{7.5 \cdot 12.5 \cdot 460} = 68.2$$

- 5.94^D 用空气表重解题 5.93.

解 5.94 (a) 由表 B1, $h_1 = 109.84\text{Btu}/\text{lb}_m$. 把此值和流速值代入下式:

$$(h_2 - h_1) + (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/50000 = 0$$

求得 $h_2 = 117.04\text{Btu}/\text{lb}_m$, 相应的, $P_2 = 1.744$. 由等熵关系, $P_2 = P_1 (P_2/P_1)$, 即 $1.744 = 1.394 (P_2/10)$, 即 $P_2 = 12.51\text{psia}$.

(b) 由连续性方程,

$$A_2/A_1 = (\bar{v}_1/\bar{v}_2)(v_2/v_1)$$

查表 B1, 得 $v = (14.70\text{psia}, 489.6^\circ\text{R}) = 12.34\text{ft}^3/\text{lb}_m$; 应用 $P-v$ 乘积, 当 12.51psia 时, 得 $v_2 = 14.51\text{ft}^3/\text{lb}_m$. 同理, $v_1 = 17.08\text{ft}^3/\text{lb}_m$. 因此,

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{600 \cdot 14.51}{7.5 \cdot 17.08} = 68.0$$

- 5.95^D 进入扩压器的干饱和蒸汽的温度为 520K , 排出时的压强为 40bar , 温度为 550K . 入口面积为 0.01m^2 , 入口的速度为 500m/s . 求: (a) 通过扩压器的质量流量 (kg/s); (b) 出口速度 (m/s); (c) 出口面积 (m^2).

解 5.95 (a) 由连续性方程, 用表中 v_1 的值, 得到

$$\dot{m} = A_1 \bar{v}_1 / v_1 = (0.01\text{m}^2)(500\text{m/s}) / (0.0525\text{m}^3/\text{kg}) = 95.24\text{kg/s}$$

(b) 将 $\bar{v}_1 = 500\text{m/s}$ 和查表得到的焓值 (kJ/kg) 代入功的方程,

$$(h_2 - h_1) + (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/2000 = 0$$

得

$$\bar{v}_2 = 260.8\text{m/s}$$

(c) 利用(b), 及比体积值,

$$A_2 - A_1 (\bar{v}_1/\bar{v}_2)(v_2/v_1) = (0.01\text{m}^2)(500/260.8)(0.0549/0.0525) = 0.020\text{m}^2$$

- 5.96 进入扩压器的干饱和蒸汽的压强为 300psia , 排出时的压强为 400psia , 温度为 450°F . 入口面积为 5in^2 , 入口的速度为 750ft/s . 求: (a) 通过扩压器的流速 (lb_m/s); (b) 出口速度 (ft/s); (c) 出口面积 (in^2).

解 5.96 (a) 由连续性方程, 用表中 v_1 的值, 得到

$$\dot{m} = A_1 \bar{v}_1 / v_1 = (5/144)(750)/1.543 = 16.88\text{lb}_m/\text{s}$$

(b) 将 $\bar{v}_1 = 750\text{ft/s}$ 和查表得到的焓值 (Btu/lb_m) 代入公式,

$$(h_2 - h_1) + (\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)/50000 = 0$$

得

$$\bar{v}_2 = 547.7\text{ft/s}$$

(c) 利用(b), 及比体积值,

$$A_2 = A_1 (\bar{v}_1 / \bar{v}_2) (v_2 / v_1) = (5 \text{ in}^2) (750 / 547.7) (1.175 / 1.543) = 5.21 \text{ in}^2$$

5. 97^D 一种不可压缩的液体 ($c = 4.2 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$) 流过一绝热良好的扩压器. 液体进入时, 压强为 1 bar, 以 120 m/s 的速度通过 0.02 m^2 的面积. 流出时通过的面积为 1 m^2 , 压强为 4 bar. (a) 求排出液体的速度 (m/s); (b) 问液体的温度有没有改变? ($^{\circ}\text{C}$)

解 (a) 由题 5.2(b) 得到

$$v_2 = v_1 (A_1 / A_2) = (120 \text{ m/s}) (0.02 / 1) = 2.4 \text{ m/s}$$

(b) 在常用的假设下, 有

$$0 = \Delta h + \Delta ke = (c \Delta T + v \Delta P) + (v_2^2 - v_1^2) / 2000 = 0$$

代入数据, 解得

$$\Delta T = 1.8 \text{ K} = 1.8^{\circ}\text{C}$$

5. 98^D 一种不可压缩的液体 ($c = 1 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{F}$, $v = 0.01603 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$) 流过一绝热良好的扩压器. 液体进入时, 压强为 15 psia, 以 250 ft/s 的速度通过 0.01 ft^2 的面积. 流出时通过的面积为 0.1 ft^2 , 压强为 75 psia. (a) 求排出液体的速度 (ft/s); (b) 问液体的温度改变多少? ($^{\circ}\text{F}$)

解 (a) 由题 5.2(b) 得

$$v_2 = v_1 (A_1 / A_2) = (250 \text{ ft/s}) (0.01 / 0.10) = 25 \text{ ft/s}$$

(b) 在常用的假设下, 有

$$0 = \Delta h + \Delta ke = (c \Delta T + v \Delta P) + (v_2^2 - v_1^2) / 50000 = 0$$

代入数据, 解得

$$\Delta T = 1.06^{\circ}\text{F}$$

5. 99 (a) 说明收缩—扩散喷管的工作原理; (b) 什么是这种喷管的临界压强?

解 (a) 这种设备就是和扩压器相连的一个(收缩)喷管. 经过适当的设计, 喷嘴中的亚音速流在截面积最小处(喉部)变成音速, 超音速的流动出现在扩压器中.

(b) 当出口的速度正好为音速时的出口压强.

涡轮机

5. 100 比较下列设备的(a)相同点和(b)不同点: (i) 涡轮机, (ii) 涡轮压缩机, (iii) 膨胀器, (iv) 膨胀发动机, (v) 涡轮膨胀机, (vi) 压缩机, (vii) 鼓风机, (viii) 泵.

解 (a) 所有的设备在流体(常为气体)中进行功能转换.

(b) (i), (iii), (iv), (v) 做正功, 而(ii), (vi), (vii), (viii) 做负功. (i), (iii), (v), (vii) 是或者可以归并于涡轮机类. (iv), (vi), (viii) 既可以是涡轮式也可以是活塞式.

5. 101^D 在空气中运行的涡轮机的入口条件为 10 bar, 750 K, 200 m/s, 出口条件为 1.25 bar, 40 m/s. 流量为 1000 kg/h. 假定气流没有热传递, 也没有摩擦(等熵). 计算: (a) 出口温度(K); (b) 输出功率(kW). 取比热为常数.

解 (a) 因为出口温度必须求出, 必须估计平均比热的值. 先假定 $k = 1.358$, $c_p = 1.089 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 对于有恒定比热的理想气体, 有 $T_2 = T_1 (P_2 / P_1)^{(k-1)/k} = (750 \text{ K}) (1.25 / 10)^{0.338/1.358} = 433 \text{ K}$. 因此, 在 433 K 到 750 K 的范围内, 更好的取值应该为 $k = 1.375$, $c_p = 1.053 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 在 $k = 1.375$ 时, $T_2 = 750 (0.125)^{0.273} = 425 \text{ K}$.

(b) 根据稳流功率方程:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{m} \left[c_p (T_2 - T_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2000} \right] = \frac{1000}{3600} \left[(1.053) (425 - 750) + \frac{40^2 - 200^2}{2000} \right] \\ &= -100 \text{ kW} \end{aligned}$$

5. 102 运用空气表重解题 5. 101.

解 (a) 对于等熵流动, $P_{r2} = P_{r1} (P_2 / P_1)$. 因此, 由表 B2, $P_{r2} = (66.11) (1.25 / 10) = 8.264$, 因此, $T_2 = 420 + [(8.26 - 8.00) / (9.43 - 8.00)] (440 - 420) = 424 \text{ K}$.

(b) 使用表中列出的焓值, 稳流功率方程给出

$$\dot{W} = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2000} \right] = \frac{1000}{3600} \left[(425.5 - 767.8) + \frac{40^2 - 200^2}{2000} \right]$$

$$= -100 \text{ kW}$$

- 5.103** 一在空气中运行的涡轮机的入口条件为 150psia, 900°R, 650ft/s, 出口条件为 17.5psia, 125ft/s, 流量为 2240lb_m/hr. 假定气流没有热传递, 也没有摩擦(等熵). 计算: (a) 出口温度(°F); (b) 输出功率(hp). 取比热为常数.

解 (a) 因为出口温度必须求出, 必须估计平均比热的值. 先假定 $k=1.358$, $c_p=0.260 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 对于有恒定单位热量的理想气体有: $T_2 = T_1 (P_2/P_1)^{(1-k)/k} = (460+900)(17.5/150)^{0.358/1.358} = 771.4^\circ\text{R}$. 因此, 在 771°R 到 1360°R 的范围内, 更好的取值应该为 $k=1.376$, $c_p=0.2514 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 在 $k=1.376$ 时, $T_2 = 1360(0.1167)^{0.273} = 296.5^\circ\text{F}$.

(b) 根据稳流功率方程(能量单位为 Btu):

$$\dot{W} = \dot{m} \left[c_p (T_2 - T_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{50000} \right]$$

$$= 2240 \left[(0.2514)(296.5 - 900) + \frac{125^2 - 650^2}{50000} \right] \frac{1 \text{ hp}}{2545 \text{ Btu/hr}}$$

$$= -141 \text{ hp}$$

- 5.104^D** 运用空气表, 重解题 5.103.

解 (a) 对于等熵流, $P_{r2} = P_{r1} (P_2/P_1)$. 因此, 由表 B1, $P_{r2} = (68.07)(17.5/150) = 7.942$. 因此, $T_2 = 750 + [(7.942 - 7.767)/(9.702 - 7.767)](800 - 750) = 754.5^\circ\text{R} = 294.8^\circ\text{F}$.

(b) 使用表中列出的焓值, 稳流功率方程给出:

$$\dot{W} = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{50000} \right] = 2240 \left[(180.8 - 332.7) + \frac{125^2 - 650^2}{50000} \right] \frac{1 \text{ hp}}{2545 \text{ Btu/hr}}$$

$$= -100 \text{ kW}$$

- 5.105** 定义涡轮机的等熵效率.

解 涡轮机的等熵效率(η)是实际的输出功除以等熵输出功[参见题 5.75]. 如果功的方程是 $W = \Delta h + \Delta ke$, 那么 $\eta = (\Delta h_a + \Delta ke_a) / (\Delta h_s + \Delta ke_s)$. 如果假定实际的涡轮机和理想的涡轮机动能变化的大小一定, $\eta \approx (\Delta h_a + \Delta ke_s) / (\Delta h_s + \Delta ke_s)$. 最后, 如果忽略动能, $\eta \approx \Delta h_a / \Delta h_s$.

- 5.106** 如果忽略动能, 题 5.101 中的结果将如何变化? (a) 如果等熵效率为 100%; (b) 如果等熵效率为 80%.

解 (a) 最终温度没有改变. 忽略动能, 由功率方程得: $\dot{W} = -95 \text{ kW}$.

(b) 焓的改变量是(a)的 80%, 因此, $\dot{W} = (0.80)(-95 \text{ kW}) = -76 \text{ kW}$.

- 5.107** 按照题 5.104 中涡轮机的情况重解题 5.106.

解 (a) 最终温度没有改变. 忽略动能, 由功率方程得 $\dot{W} = -133.7 \text{ hp}$.

(b) 焓的变化现在是(a)的 80%, 因此, $\dot{W} = (0.80)(-133.7 \text{ hp}) = -107 \text{ hp}$.

- 5.108^D** 5bar, 900K 的空气进入一个绝热良好的涡轮机, 排出时的压强为 1bar. 如果流量为 5kg/s, 涡轮机的功率为 1MW, 求涡轮机的效率.

解 忽略能量项, 由稳流功率方程, 得 $\dot{W} = \dot{m} \Delta h$. 如果涡轮机有理想的效率, 空气将等熵膨胀, 因此(表 B2) $P_{r2} = P_{r1} (P_2/P_1) = (133.25)(1/5) = 26.65$. 在这种条件下,

$$T_{2s} = 650 + (5.66/7.82)(50) = 686.2 \text{ K}, h_{2s} = 699.1 \text{ kJ/kg}$$

因此,

$$\dot{W}_s = (5 \text{ kg/s})[(699.1 - 933.5) \text{ kJ/kg}] = -1172 \text{ kW}$$

效率为

$$\eta = \dot{W}_a / \dot{W}_s = (1000 \text{ kW}) / (1172 \text{ kW}) = 85.3\%$$

- 5.109^D** 75psia, 1600°R 的空气进入一个绝热良好的涡轮机, 排出时的压强为 15psia. 如果流量为 10lb_m/s, 涡轮机的功率为 1750hp, 求涡轮机的效率.

解 忽略能量项, 由稳流功率方程, 得 $\dot{W} = \dot{m} \Delta h$. 如果涡轮机有理想的效率, 空气将等熵膨胀.

因此(表 B1) $P_2 = P_1 (P_2/P_1) = (127.0)(15/75) = 25.4$. 在这种条件下,

$$T_{2s} = 1000 + [(25.40 - 21.71)/(30.44 - 21.71)](1100 - 1000) = 1342^\circ\text{R}, h_{2s} = 251.7 \text{ Btu/lb}_m$$

因此,

$$\dot{W}_s = (10 \text{ lb}_m/\text{s})[(251.7 - 396.0) \text{ Btu/lb}_m][1.4145 \text{ hp}/(\text{Btu/s})] = -2041 \text{ hp}$$

效率为

$$\eta = \dot{W}_s / \dot{W}_i = 1750/2041 = 85.7\%$$

- 5.110^D 在题 5.108 中, 涡轮机的绝热性能降低, 输出功率降为 900 kW. 空气热损失为多少 (kJ/kg)?

解 涡轮机的效率假定不受适量的热散的影响. 因此, 热散决定了输出功率的损失

$$-\dot{m}q = \dot{W}_{\text{new}} - \dot{W}_{\text{old}}$$

或者

$$q = \frac{\dot{W}_{\text{old}} - \dot{W}_{\text{new}}}{\dot{m}} = \frac{-1000 + 900 \text{ kW}}{5 \text{ kg/s}} = -20 \text{ kJ/kg}$$

- 5.111^D 在题 5.109 中, 涡轮机的绝热性能降低, 输出功率降为 1700 hp. 空气热损失为多少 (Btu/lb_m)?

解 根据题 5.110 的公式,

$$q = \frac{-50 \text{ hp}}{10 \text{ lb}_m/\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ Btu/s}}{1.4145 \text{ hp}} = -3.54 \text{ Btu/lb}_m$$

- 5.112 大气压(14.7 psia)下 685 lb_m/hr 的干饱和致冷剂在涡轮机中被压缩为 200 psia. 排出后的压强为 160°F, 速度为 10 ft/s. 如果入口的速度为 150 ft/s, 涡轮机的热量损失为 50 000 Btu/hr, 求驱动涡轮机所做的功(ft · lb_f/lb_m R12).

解 由稳流功率方程

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} + w = (h_2 - h_1) + \frac{(\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2)}{50000}$$

代入 $\dot{Q}/\dot{m} = -50000/685$ $\bar{v}_1 = 150$ $\bar{v}_2 = 10$
和 $h_1 = 74.92, h_2 = 95.10$ (查表 C3), 结果为

$$w = 92.92 \text{ Btu/lb}_m - 92.92 \times 778 = 72300 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$$

- 5.113 需要多少马来驱动题 5.112 中的涡轮机?

$$\dot{W} = \dot{m}w = (685 \text{ lb}_m/\text{hr})(92.92 \text{ Btu/lb}_m) \frac{1 \text{ hp}}{2545 \text{ Btu/hr}} = 25 \text{ hp}$$

- 5.114^D TUTORB 冷冻系统用一个涡轮机来做功, 致冷剂 R12 由 5 bar 的饱和液体膨胀到 1.5 bar 的气-液混合物. 如果对每 kg 致冷剂 R12, 涡轮机做功为 4 kJ, 求它的效率.

解 理想效率的膨胀是可逆绝热的, 因此(表 C4) $s_2 = s_1$ (s_f 在 5 bar 时取值) = 4.052 kJ/kg · K. 这会产生干度为 x_{2s} 的气-液混合物, $4.052 = (1 - x_{2s})(3.893) + x_{2s}(4.576)$, 即 $x_{2s} = 0.233$. 在此条件下,

$$h_{2s} = (1 - 0.233)(372.1) + (0.233)(538.2) = 4 \text{ kJ/kg}$$

最大输出功为

$$|h_{2s} - h_1| = |411.0 - 414.8| = 4.8 \text{ kJ/kg}$$

因此, 效率为 $\eta = 4/4.8 = 83.3\%$.

- 5.115^D TUTORB 致冷系统用一个涡轮机来做功, 致冷剂 R12 由 75 psia 的饱和液体膨胀到 20 psia 的气-液混合物. 如果对致冷剂 R12, 涡轮机做功为 1.15 Btu/lb_m, 求它的效率.

解 理想效率的膨胀是可逆绝热的, 因此(表 C3) $s_2 = s_1$ (75 psia 时的 s_f 值) = 0.470 Btu/lb_m · °R. 这会产生干度为 x_{2s} 的气-液混合物, $0.470 = (1 - x_{2s})(0.0155) + x_{2s}(0.1697)$, 即 $x_{2s} = 0.2043$. 在此条件下,

$$h_{2s} = (1 - 0.204)(6.56) + (0.204)(76.40) = 1.38 \text{ Btu/lb}_m$$

最大输出功为

$$|h_2 - h_1| = |20.81 - 22.19| = 1.38 \text{ Btu/lb}_m$$

因此,效率为 $\eta = 1.15/1.38 = 83.3\%$.

- 5.116^D 一个蒸汽轮机工作的人口条件为 15bar, 600K, 蒸汽的入口速度为 200m/s. 排出后为干饱和气体, 温度为 300K, 速度为 50m/s. 如果 2000kg/min 的流量产生的输出功率为 10MW, 求热传递的方向和大小(MW).

解 由稳流功率方程

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2000} \right]$$

代入(查表得)得

$$\dot{W} = -10^4 \text{ (kW)}$$

$$\dot{m} = 2000/60$$

$$v_1 = 200, \quad v_2 = 50$$

$$h_1 = 3098, \quad h_2 = 2550$$

$$\dot{Q} = -8900 \text{ kW} = -8.9 \text{ MW}$$

负号代表热量损失.

- 5.117^D 一个蒸汽轮机工作的人口条件为 250psia, 600°F, 蒸汽的入口速度为 650ft/s. 排出后为干饱和气体, 温度为 80°F, 速度为 150ft/s. 如果 5000lb_m/min 的流量产生的输出功率为 13500hp, 求热传递的方向和大小(Btu/s).

解 由稳流功率方程,

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \left[(h_2 - h_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{50000} \right]$$

代入下列值:

$$\dot{W} = -(13500/1.4145) \text{ (Btu/s)}; \dot{m} = 5000/60; v_1 = 650, v_2 = 150; h_1 = 1319, h_2 = 1096$$

得

$$\dot{Q} = -9705 \text{ Btu/s}$$

负号代表热量损失.

- 5.118^D 轮机中的水蒸气由 20bar, 600K 等熵地膨胀到 1bar. 求:(a) 排出气体的干燥系数(干度)或物理状态;(b) 流量为 5kg/s 时的输出功率(MW).

解 (a) 入口条件, $h_1 = 3087 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 6.875 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 对于等熵膨胀, $s_1 = s_2 = 6.875 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $P_2 = 1 \text{ bar}$. 由 1bar 饱和蒸汽表可知 $s_2 < s_g$; 因此, 排出气体为气液混合物, 干燥系数(干度)满足: $s_{\text{mix}} = 6.875 = (1 - x_2)s_{f2} + x_2s_{g2} = (1 - x_2)(1.303) + x_2(7.360)$, 即 $x_2 = 92\%$, 蒸汽. 在这种条件下,

$$h_2 = (1 - 0.92)(417.5) + (0.92)(2675) = 2500 \text{ kJ/kg}$$

(b) 因为没有给出热量损失, 流速, 落差等信息, 稳流功率方程简化为 $\dot{W} = \dot{m}\Delta h = (5 \text{ kg/s})[(2494 - 3087) \text{ kJ/kg}] = -2965 \text{ kW}$, 接近 3MW 的功率输出.

- 5.119^D 轮机中的水蒸气由 300psia, 600°F 等熵地膨胀到 14.7psia. 求:(a) 排出气体的干燥系数(干度)或物理状态;(b) 流量为 10lb_m/s 时的输出功率(hp).

解 (a) 入口条件, $h_1 = 1315 \text{ Btu/lb}_m$, $s_1 = 1.627 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 对于等熵膨胀, $s_1 = s_2 = 1.627 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $P_2 = 14.7 \text{ psia}$. 14.7psia 饱和气体的数据为 $s_f = 0.312 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $s_g = 1.757 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 因此, 排出气体为气液混合物, 干燥系数(干度)满足: $s_{\text{mix}} = 1.627 = (1 - x_2)s_{f2} + x_2s_{g2} = (1 - x_2)(0.312) + x_2(1.757)$, 即 $x_2 = 91\%$, 蒸汽. 在这种条件下,

$$h_2 = (1 - 0.91)(180.2) + (0.91)(1151) = 1064 \text{ Btu/lb}_m$$

(b) 因为没有给出热量损失, 流速, 落差等信息, 稳流功率方程简化为

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{m}\Delta h = (10 \text{ lb}_m/\text{s})[(1064 - 1315) \text{ Btu/lb}_m][1.4145 \text{ hp/(Btu/s)}] \\ &= -3550 \text{ hp (负号代表输出)} \end{aligned}$$

- 5.120^D 轮机中的水蒸气由 20bar, 600K 膨胀为 1bar 的饱和气体. 求:(a) 流量为 5kg/s 时功率输出(MW);(b) 涡轮机的效率;(c) 和题 5.118 的结果进行比较.

解 (a)在题 5.118 中, $h_1 = 3087 \text{ kJ/kg}$, 但现在 $h_2 = 2675 \text{ kJ/kg}$. 因此,

$$\dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1) = 5(2675 - 3087) = -2060 \text{ kW} \quad \text{即约为 } 2 \text{ MW}$$

$$(b) \quad \eta \approx (2 \text{ MW}) / (3 \text{ MW}) = 67\%$$

(c)在题 5.118 中, 完全有效的涡轮机的水蒸气产生 3 MW 的功率, 排出包含 8% 液体的蒸汽. 本题中, 效率不高的涡轮机产生 2 MW 的功率, 排出干饱和气体. 设计涡轮机时, 因为存在腐蚀的问题, 排出的蒸汽中不能含有超过 10% 的液体, 并且, 效率低于 80% 的涡轮机也是不可接受的.

5.121^D 涡轮机中的水蒸气由 300 psia, 600°F 膨胀为 14.7 psia 的饱和气体. 求: (a) 流量为 10 lb_m/s 时功率输出 (MW); (b) 涡轮机的效率; (c) 和 5.119 题的结果进行比较.

解 (a)在题 5.119 中, $h_1 = 1315 \text{ Btu/lb}_m$, 但现在 $h_2 = 1151 \text{ Btu/lb}_m$. 因此,

$$\dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1) = (10 \text{ lb}_m/\text{s})[(1151 - 1315) \text{ Btu/lb}_m][1.4145 \text{ hp}/(\text{Btu/s})] = -2320 \text{ hp}$$

$$(b) \quad \eta = (2320 \text{ hp}) / (3550 \text{ hp}) = 65.3\%$$

(c)在题 5.119 中, 完全有效的涡轮机又水蒸气产生 3550 hp 的功率, 排出包含 9% 液体的蒸汽. 本题中, 效率不高的涡轮机只产生 2320 hp 的功率, 排出干饱和气体. 设计涡轮机时, 因为存在腐蚀问题, 排出蒸汽中不能含有超过 10% 的液体, 并且, 效率低于 80% 的涡轮机也是不可接受的.

压缩机

5.122 定义压缩机的(等熵)效率.

解 $\eta = W_s / W_a \approx \Delta h_s / \Delta h_a$ (参见题 5.105).

5.123^D (a) 一个空气压缩机的入口温度为 300 K. 如果可以等熵地工作, 出口温度为 575 K. 而实际的出口温度为 600 K, 求此压缩机的效率; (b) 在 T - s 图上画出(a)部分的工作过程.

解 (a) 假定比热恒定, $\eta = \Delta h_s / \Delta h_a = (T_{2s} - T_1) / (T_{2a} - T_1) = (575 - 300) / (600 - 300) = 91.7\%$. 如果应用表 B2, $\eta = (h_{2s} - h_1) / (h_{2a} - h_1) = (581.3 - 300.2) / (607.4 - 300.2) = 91.5\%$.

(b) 如图 5-15.

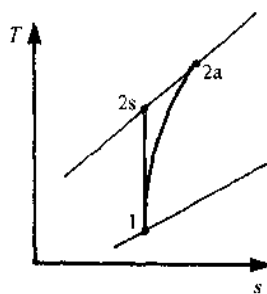


图 5-15

5.124^D (a) 一个空气压缩机的入口温度为 80°F. 如果可以以等熵过程工作, 出口温度为 575°F. 而实际的出口温度为 600°F, 求此压缩机的效率; (b) 在 T - s 图上画出(a)部分的工作过程.

解 (a) 假定单位热量恒定, $\eta = \Delta h_s / \Delta h_a = (T_{2s} - T_1) / (T_{2a} - T_1) = (575 - 80) / (620 - 80) = 91.7\%$. 如果运用表 B1, $\eta = (h_{2s} - h_1) / (h_{2a} - h_1) = (249.9 - 129.1) / (261.2 - 129.1) = 91.4\%$.

(b) 如图 5-15.

5.125 空气进入一个空气压缩机时为 14.7 psia, 60°F, 排出时的状态为 150 psia, 640°F, 求此压缩机的等熵效率. (a) 假定为理想气体条件; (b) 利用表 B1.

解 (a) 对理想气体的等熵过程,

$$T_{2s} = T_1 (P_2 / P_1)^{(k-1)/k} = (460 + 60) (150 / 14.7)^{(1.4-1)/0.4} = 1010^\circ \text{R} = 550^\circ \text{F}$$

因此(比体积恒定),

$$\eta = (T_{2s} - T_1) / (T_{2a} - T_1) = (550 - 60) / (640 - 60) = 84.5\%$$

(b) 由表 B1, 对于等熵过程, $P_{2s} = P_{2a} (P_2 / P_1) = (2.140) (150 / 14.7) = 21.84$, 得

$$T_{2s} = 1000 + [(21.84 - 21.71) / (30.44 - 21.71)] (1100 - 1000) = 1001^\circ \text{R}$$

在 1001°R 时,

$$h_{2s} = 241.1 + (1/100) (25.1) = 241.4 \text{ Btu/lb}_m$$

排出气体的实际温度 640°F = 1100°R, $h_{2a} = 266.2 \text{ Btu/lb}_m$. 因此,

$$h_1 = 124.2 \text{ Btu/lb}_m \quad \eta = (h_{2s} - h_1) / (h_{2a} - h_1) = (241.4 - 124.2) / (266.2 - 124.2) = 82.5\%$$

5.126^D 评价以下说法: 在等熵过程中, 空气进入空压机时的参数为 1 bar, 300 K, 排出时的参数为 15 bar, 575 K.

解 设空气为理想气体, $c_p = 1.019 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (给定温度区间中点的取值). 那么, 如果是可逆

的过程,由题 2.325 可知

$$\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1) = 1.019 \ln(575/300) - 0.287 \ln(15/1) = -0.2010 > 0$$

所以,本过程是不可能等熵的。

- 5.127^D 评价以下说法:在等熵过程中,空气进入空压机时的参数为 15psia, 80°F, 排出时的参数为 1500psia, 350°F。

解 取 $c_p = 0.2415 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 如题 5.126, 可求出 $\Delta s = 0.2415 \ln(810/540) - 0.069 \ln 100 = -0.22 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。由于 $\Delta s < 0$, 本过程不可能是等熵的, 或绝热的。

- 5.128 氨气流稳定地通过一个绝热的压缩机。在入口处, 温度为 300K, 压强为 0.5bar, 在出口处, 温度为 500K, 压强为 4bar。忽略速度的影响。将氨气视为半理想气体(题 2.301)并且利用表 5-1 中的数据, 计算: (a) 使压缩机工作需做的功(kJ/kg); (b) 此流体单位熵的变化(kJ/kg·K); (c) 如果气流是可逆的, 求出口处的温度(K); (d) 等熵效率; (e) 620K 时的 P_r 值, 需和表中的其他值一致(不允许用外推法)。

解 (a) $\dot{W}/\dot{m} = h_2 - h_1 = 518.5 - 59.7 = 458.8 \text{ kJ/kg}$, 注意对半理想气体 $h = h(T)$ 。

(b) 根据题 2.90,

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln(P_2/P_1) = 1.349 - 0.191 - 0.4882 \ln(4/0.5) = 0.143 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

(c) 如果可逆并且绝热(即等熵), 那么, $P_{r2} = P_{r1}(P_2/P_1) = (1.479)(8) = 11.832$ 。相应地,

$$T_{2s} = 460 + [(11.832 - 10.437)/(12.888 - 10.437)](20) = 471.4 \text{ K}$$

(d) 对压缩机, $\eta = \Delta h_s / \Delta h_a$ 。在 471.4K 时, $h_{2s} = 421.4 + (11.4/20)(469.6 - 421.4) = 448.9 \text{ kJ/kg}$; 在 500K 时, $h_{2a} = 518.5 \text{ kJ/kg}$ 。在 300K 时, $h_1 = 59.7 \text{ kJ/kg}$ 。因此,

$$\eta = (448.9 - 59.7)/(518.5 - 59.7) = 84.8\%$$

(e) 根据题 2.90, $P_r = K \exp(s^0/R)$ 。由表 5-1, 当 $s^0 = 0$, $P_r = 1$ 时, $K = 1$, 那么,

$$P_r(620\text{K}) = e^{1.902/0.4882} = 49.202$$

表 5-1

温度 T/K	比焓 $h/(\text{kJ/kg})$	熵函数 $s^0 = \int_{T_0}^T c_p dT/T / (\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$	相对压强 P_r
273	0	0	1
280	16.0	0.051	1.110
300	59.7	0.191	1.479
320	101.5	0.327	1.954
340	145.1	0.457	2.550
360	189.8	0.582	3.294
380	235.5	0.703	4.221
400	281.5	0.818	5.342
420	327.7	0.931	6.733
440	374.2	1.039	8.400
460	421.4	1.145	10.437
480	469.6	1.248	12.888
500	518.5	1.349	15.851
520	568.4	1.448	19.414
540	619.0	1.543	23.585
620	828.0	1.902	

$$R = 0.4882 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

- 5.129 300K 的饱和致冷剂 R12 气体以 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的速率进入绝热良好, 内部可逆的压缩机, 传递压强是 10bar。需要多大的功率(kW)?

解 这是一个等熵过程, $\dot{W} = \dot{m} \Delta h = (V/v) \Delta h$ 。由表 C2, 对于入口条件, 有 $h_1 = 563.5 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 4.548 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = s_2$ 。表 C6 显示输出的温度必定低于 320K; 代入公式, $T_2 = 320 + [(4.458 - 4.557)/(4.580 - 4.557)](330 - 320) = 316.1 \text{ K}$, 此时, $h_2 = 569.9 \text{ kJ/kg}$ 。由入口条件, $v_1 = 0.0258 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。因此, $\dot{W} = (0.5/0.0258)(569.9 - 563.5) = 124 \text{ kW}$ 。

热交换器; 流体混合

5. 130 (a) 叙述热交换器的用途; (b) 绘图表示顺流(平行流动)和逆流(反向平行流动)热交换, 比较它们的异同点.

解 (a) 在两种流体间交换能量, 而不把它们混合.

(b) 见图 5-16, 它们在两种流体间交换等量的热量; 在两种情况下, 流体间的温差都由在入口处的最大值变化到在出口处的最小值. 然而, 对于逆流热交换器来说, 流体从其一端流到另一端的温差的变化很小.

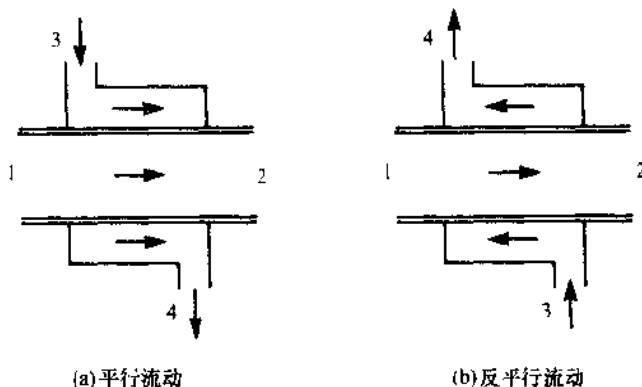


图 5-16

5. 131^D 绝热良好的热交换器, 用来在空气和致冷剂 R12 之间交换热量. 致冷剂 R12 以饱和液体进入[图 5-16 的 1 处], 温度为 250K, 流量为 5kg/min, 空气进入时[图 5-16 的 3 处]为 5bar, 400K, 流量为 1kg/min, 在恒定压强下被冷却为 300K. 如果流体的压降可以忽略, 求致冷剂 R12 在 2 处的状态和温度(K).

解 整个过程是等焓的, 因此, $\Delta H_{R12} + \Delta H_{air} = \dot{m}_{R12} \Delta h_{R12} + \dot{m}_{air} \Delta h_{air} = 0$, 或者化成简单的无量纲形式,

$$\frac{\dot{m}_{air}}{\dot{m}_{R12}} + \frac{\Delta h_{R12}}{\Delta h_{air}} = 0 \quad (1)$$

代入数值, 使用国际单位制的表中焓的值,

$$\frac{1}{5} + \frac{h_2 - 378.5}{300.2 - 401.2} = 0$$

由此,

$$h_2 = 398.7 \text{ kJ/kg}$$

致冷剂 R12 在流入压强(1.336bar, 在 250K 时)下的热焓值介于饱和液体的 378.5kJ/kg 和饱和蒸汽 541.5kJ/kg 之间. 因此其状态为气-液混合物, 温度为 250K.

5. 132^D 绝热良好的热交换器, 用来在空气和致冷剂 R12 之间交换热量. 空气进入时[图 5-16 的 1 处], 压强为 50psia, 温度为 0°F, 流量为 0.10lb_m/s, 被加热到 160°F, 致冷剂 R12 以饱和蒸汽进入时[图 5-16 的 3 处]为 300psia, 流量为 0.50lb_m/s, 在恒定压强下被冷却为 300K. 如果压降可以忽略, 求致冷剂 R12 在 4 处的状态和温度(°F).

解 将题 5. 131(1)中 USCS 单位制的数值代入:

$$\frac{1}{5} + \frac{h_2 - 91.24}{148.3 - 109.8} = 0$$

由此,

$$h_2 = 83.54 \text{ Btu/lb}_m$$

致冷剂 R12 在流入压强(300psia)下的焓值介于饱和液体和气体 48.41Btu/lb_m 和饱和蒸汽的 91.24Btu/lb_m 之间. 因此其状态为气-液混合物, 温度为 166.2°F.

- 5.133^D 在绝热的容器中, 90°C, 20kg/s 的水流与 20°C, 250kg/s 的水流混合. 水流可以近似为不可压缩的液体, 并且可以忽略动能和势能的变化, 求出口处蒸汽的温度(°C).

解 从热力学角度来讲, 可以不考虑两种流体是否混合. 因此, 题 5.131 中的式(1)成立, 焓的变化只和出口条件(下标 3)有关. 在表 A2 中进行内插, 得

$$\frac{20}{250} + \frac{h_3 - 83.9}{h_2 - 109.8} = 0$$

由此,

$$h_3 = 105.6 \text{ kJ/kg}$$

相应地,

$$T_3 = 290 - [(105.6 - 70.7)/(112.5 - 70.7)](19) = 298.35 \text{ K} = 25.2^\circ\text{C}$$

- 5.134^D 在绝热的容器中, 20°F, 50lb_m/s 的水流与 65°F, 500lb_m/s 的水流混合. 水流可以近似为不可压缩的液体, 并且可以忽略动能和势能的变化, 求出口处蒸汽的温度(°F).

解 从热力学角度来讲, 可以不考虑两种流体是否混合. 因此, 题 5.131 中的式(1)成立, 焓的变化只和普通的出口条件(下标 3)有关. 在表 A1 中进行代换, 得

$$\frac{50}{500} + \frac{h_3 - 33.1}{h_3 - 377.0} = 0$$

由此,

$$h_3 = 45.37 \text{ Btu/lb}_m$$

相应地,

$$T_3 = 60 + [(45.4 - 28.1)/(48.1 - 28.1)](80 - 60) = 77.3^\circ\text{F}$$

接入质量和能量守恒

- 5.135^D 15bar, 600K 的水蒸气进入一根直径为 0.10m 的绝热长管道. 出口处的条件为 10bar, 550K, 管道直径为 0.05m. 计算流量(kg/s)和流速(m/s).

解 由连续性方程得

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \frac{0.246}{0.179} (2)^2 = 5.497$$

可由表 A5 得到比体积. 另一方面, 由稳流能量方程得(没有热传递, 没有做功, 没有重力势能的变化)

$$0 = (h_2 - h_1) + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2000} = -96 + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2000}$$

比焓可以由表 A5 得到. 联立解(1)(2)求得 $\bar{v}_2 = 445.6 \text{ m/s}$.

那么,

$$\dot{m} = A_2 \bar{v}_2 / v_2 = (\pi/4)(0.05)^2 (445.6) / 0.246 = 3.6 \text{ kg/s}$$

- 5.136^D 200psia, 600°F 的水蒸气进入一根直径为 4in 的绝热长管道. 出口处的条件为 150psia, 500°F, 管道直径为 2in. 计算流量(lb_m/s)和流速(ft/s).

解 连续性方程给出

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 = \frac{3.680}{3.058} (2)^2 = 4.814 \quad (1)$$

这里比体积的值由表 A3 中得到. 另一方面, 稳流能量方程给出(没有热量、功、重力势能的变化)

$$0 = (h_2 - h_1) + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{50000} = -48 + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{50000} \quad (2)$$

这里比焓的值从表 A3 中得到. 解式(1)(2)可得到 $\bar{v}_2 = 1584 \text{ ft/s}$. 那么,

$$\dot{m} = A_2 \bar{v}_2 / v_2 = (\pi/4)(2/12)^2 (1584) / 3.680 = 9.39 \text{ lb}_m/\text{s}$$

- 5.137^D 空气流通过一根内直径为 12mm, 完全绝热的水平管. 入口处的气压和温度分别为 5 bar, 50°C, 出口处为 1 bar, 20°C. 计算出口处的速度(m/s), 假设是理想气体.

解 利用题 5.2(c),

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = \frac{T_2 P_1}{T_1 P_2} = \frac{293}{323} \frac{5}{1} = 4.536 \quad (1)$$

$c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 比能方程 $c_p \Delta T + \Delta ke = 0$, 化为

$$-30.15 + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2000} = 0 \quad (2)$$

同时解方程式(1)和(2)得到 $\bar{v}_2 = 252 \text{ m/s}$.

5. 138^D 对于题 5. 137, 使用空气表(半理想气体).

解 连续性方程现在为

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{0.841}{0.1855} = 4.534 \quad (1)$$

这里 v_1 可由表 B2 中的温度插值得到, v_1 是 1 bar, 323 K 时的值, 通过利用 P - v 积(见题 2. 96). 比能方程 $\Delta h + \Delta ke = 0$, 现为

$$(293.2 - 323.4) + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2000} = 0 \quad (2)$$

比焓可从表 B2 中的温度插值查到. 同时解方程式(1)和(2), 可得到 $\bar{v}_2 = 252 \text{ m/s}$ (同上).

5. 139^D 空气流通过一根内直径为 0. 5 in. 完全绝热的水平管. 入口处的气压和温度分别为 75 psia, 120°F, 出口处为 15 psia, 65°F. 计算出口处的速度(ft/s), 假设是理想气体.

解 利用题 5. 2(c),

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = \frac{T_2 P_1}{T_1 P_2} = \frac{525}{580} \frac{75}{15} = 4.526 \quad (1)$$

已知 $c_p = 0.240 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$, 比能方程, $c_p \Delta T + \Delta ke = 0$, 化为

$$-13.2 + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{50000} = 0 \quad (2)$$

同时解方程(1)和(2)可得到 $\bar{v}_2 = 833 \text{ ft/s}$.

5. 140^D 对于题 5. 139, 使用空气表(半理想气体).

解 连续性方程现在为

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{12.970}{2.867} = 4.524 \quad (1)$$

这里, 比体积可由表 B1 插值及(或) P - v 积求得(见题 2. 97). 比能方程, $\Delta h + \Delta ke = 0$, 现为

$$(125.4 - 138.7) + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{50000} = 0 \quad (2)$$

比焓可从表 B1 中的温度插值查得. 同时解方程(1)和(2), 可得 $\bar{v}_2 = 836 \text{ ft/s}$.

5. 141^D 1 bar, 300 K 的空气进入加热器, 流出时为 5 bar, 600 K. 出口面积是入口处十倍. 加热器给每千克空气增加 275 kJ 能量. 计算入口处和出口处的速度(m/s), 将气体视为理想气体, $c_p = 1.0207 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

解 从连续性方程[题 5. 2(c)],

$$\frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} = \frac{A_2 P_2 T_1}{A_1 P_1 T_2} = \frac{10}{1} \frac{5}{1} \frac{300}{600} = 25 \quad (1)$$

比能方程为 $q = c_p \Delta T + \Delta ke = 0$, 或

$$275 = (1.0207)(300) - \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{2000} \quad (2)$$

同时解方程(1)和(2), 得到 $\bar{v}_1 = 250 \text{ m/s}$, $\bar{v}_2 = 10 \text{ m/s}$.

5. 142^D 空气进入加热器时为 15 psia, 80°F, 在出口处流出时为 75 psia, 600°F. 出口端面积是入口端的 5 倍. 加热器以 100 Btu/lb_m 的热量给空气加热. 求出气体入口速度和出口速度(ft/s), 假设空气为理想气体, $c_p = 0.2436 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

解 由连续性方程[题 5. 2(c)],

$$\frac{\bar{v}_1}{\bar{v}_2} = \frac{A_2 P_2 T_1}{A_1 P_1 T_2} = \frac{5}{1} \frac{75}{15} \frac{540}{1060} = 12.74 \quad (1)$$

比能方程为 $q = c_p \Delta T + \Delta ke = 0$, 或

$$100 = (0.2436)(520) + \frac{\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2}{50000} \quad (2)$$

同时解方程(1)和(2), 得到 $\bar{v}_1 = 1159 \text{ ft/s}$, $\bar{v}_2 = 91 \text{ ft/s}$.

熵产

5.143^D 证明题 5.137 中的流动是不可逆的。

解 根据该题的假设,

$$\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1) = 1.005 \ln(293/323) - 0.287 \ln(1/5) = 0.3639 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} > 0$$

根据熵增原理(题 3.124),该过程是不可逆的。

5.144^D 证明题 5.138 中的流动不可逆。

解 由于半理想气体, $\Delta s = (s_2^0 - s_1^0) - R \ln(P_2/P_1)$: 从表 B2, 在 $50 + 273 = 323\text{K}$ 时, $s_1^0 = 6.932 + (3/20)(6.993 - 6.932) = 6.941 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 在 $20 + 273 = 293\text{K}$ 时, $s_2^0 = 6.797 + (13/20)(6.867 - 6.797) = 6.843 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此 $\Delta s = (6.843 - 6.941) - 0.287 \ln(1/5) = 0.364 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} > 0$. 根据熵增原理,该过程是不可逆的。

5.145^D 证明题 5.139 中的流动不可逆。

解 根据该题的假设, $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1) = 0.2402 \ln(525/580) - 0.0685 \ln(15/75) = 0.0863 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} > 0$. 那么 $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1) = 0.2403 \ln(529.1/580) - 0.069 \ln(14.7/25) = 0.0145 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$. 因此

$$S = m\Delta s = (1.25 \text{ lbm/s})(0.0145 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}) = 0.0181 \text{ Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$$

如果使用表 B1, $\Delta s = (s_2^0 - s_1^0) - R \ln(P_2/P_1) = (1.6353 - 1.6576) - 0.069 \ln(14.7/25) = 0.0143 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$. 因此

$$S = m\Delta s = (1.25 \text{ lbm/s})(0.0143 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}) = 0.0179 \text{ Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$$

5.146^D 证明题 5.140 中的流动不可逆。

解 由于是半理想气体, $\Delta s = (s_2^0 - s_1^0) - R \ln(P_2/P_1) = (1.6334 - 1.6576) - 0.0685 \ln(15/75) = 0.0860 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} > 0$. 根据熵增原理,该过程是不可逆的。

5.147^D 空气以 0.5 kg/s 进入绝热喷管. 入口状态是 $2 \text{ bar}, 50^\circ\text{C}$; 出口条件是 $1 \text{ bar}, 250 \text{ m/s}$ 以及横截面积是 0.002 m^2 . 熵产生的速度是多少(kW/K)?

解 题 5.24 里计算得到的出口的温度是 348.4 K . 将比热作为一个常数, 平均温度是 $(323 + 348)/2 = 336 \text{ K}$, 在这个温度下 $c_p \approx 1.007 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 那么 $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1) = 1.007 \ln(348/323) - 0.287 \ln(1/2) = 0.274 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此,

$$S = m\Delta s = (0.5 \text{ kg/s})(0.274 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) = 0.137 \text{ kW/K}$$

如果使用表 B2,

$$\Delta s = (s_2^0 - s_1^0) - R \ln(P_2/P_1) = (7.017 - 6.942) - 0.287 \ln(1/2) = 0.274 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

因此

$$S = m\Delta s = (0.5 \text{ kg/s})(0.274 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) = 0.137 \text{ kW/K}$$

5.148^D 空气以 1.25 lbm/s 进入绝热喷管. 入口状态是 $25 \text{ psia}, 120^\circ\text{F}$; 出口条件是 $14.7 \text{ psia}, 800 \text{ ft/s}$, 而横截面积是 3.0 in^2 . 熵产生的速度是多少($\text{Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$)?

解 题 5.25 里计算得到的出口的温度是 529.1°R . 将比热作为一个常数, 平均温度是 $(580 + 529)/2 = 555^\circ\text{R}$, 在这个温度下 $c_p \approx 0.2403 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$. 那么 $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(P_2/P_1) = 0.2403 \ln(529.1/580) - 0.069 \ln(14.7/25) = 0.0145 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$. 因此,

$$S = m\Delta s = (1.25 \text{ lbm/s})(0.0145 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}) = 0.0181 \text{ Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$$

如果使用表 B1,

$$\Delta s = (s_2^0 - s_1^0) - R \ln(P_2/P_1) = (1.6353 - 1.6576) - 0.069 \ln(14.7/25) = 0.0143 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$$

因此

$$S = m\Delta s = (1.25 \text{ lbm/s})(0.0143 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}) = 0.0179 \text{ Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$$

5.149^D $5 \text{ bar}, 500 \text{ K}$ 状态下的空气以 10 kg/min 的速度进入一环形管. 在其中的一点压强和温度分别是 4.75 bar 和 450 K . 如果周围的温度是 300 K , 产生的总熵是多少(kW/K)?

解 对于管内的流动, 从表 B2 可以得到,

$$\Delta s = (s_2^0 - s_1^0) - R \ln(P_2/P_1) = (7.330 - 7.385) - 0.287 \ln(4.75/5.00) = -0.040 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

所以

$$\dot{S}_{\text{air}} - \dot{m}\Delta s = (10\text{kg/min})(-0.040\text{kJ/kg}\cdot\text{K}) = -0.40\text{kJ/min}\cdot\text{K}$$

对于周围的环境,流入的热量是 $q = -\Delta h_{\text{air}} = -(452.0 - 503.4) = 51.4\text{kJ/kgair}$, 因此 $\dot{S}_{\text{sur}} = \dot{m}q/T_{\text{sur}} = (10\text{kg/min})(51.4\text{kJ/kg})/(300\text{K}) = 1.713\text{kJ/min}\cdot\text{K}$, 总熵的变化是

$$\dot{S}_{\text{air}} + \dot{S}_{\text{sur}} = -0.40 + 1.713 = 1.313\text{kJ/min}\cdot\text{K} = 0.0219\text{kW/K}$$

5. 150^D 75psia, 500°F 状态下的空气以 20 lb_m/min 的速度进入一环形管. 在其中的一点压强和温度分别是 62psia 和 450°F. 如果周围的温度是 80°F, 产生的总熵是多少(Btu/min·°R)?

解 对于管内的流动,从表 B1 可以得到, $\Delta s = (s_2^0 - s_1^0) - R\ln(P_2/P_1) = (1.767 - 1.780) - 0.0686\ln(62/75) = 0.000\text{Btu/min}\cdot\text{°R}$; 所以 $\dot{S}_{\text{air}} = \dot{m}\Delta s = 0.000\text{Btu/min}\cdot\text{°R}$.

对于周围的环境,流入的热量是 $q = -\Delta h_{\text{air}} = -(218.8 - 231.0) = 12.2\text{Btu/lbmair}$, 因此 $\dot{S}_{\text{sur}} = \dot{m}q/T_{\text{sur}} = (20\text{lbm/min})(12.2\text{Btu/lbm})/(540\text{°R}) = 0.452\text{Btu/min}\cdot\text{°R}$. 总熵的变化是

$$\dot{S}_{\text{air}} + \dot{S}_{\text{sur}} = 0.000 + 0.452\text{Btu/min}\cdot\text{°R}$$

5. 151^D 5kg/s 的 R12 在入口条件 2bar, 300K 下被节流, 熵产速率是多少(kW/K)?

解 作为一个不可逆过程, 节流必然引起熵增. 从题 5. 62, 这个过程的两个等熵点是 (1) 2bar, 300K; (2) 6. 58bar, 310K. 从表中可得到

$$s_2 = 4.583 + (0.58/2)(4.556 - 4.583) = 4.575\text{kJ/kg}\cdot\text{K} \quad s_1 = 4.650\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

因此节流包含了压强的减少, $\Delta s = s_1 - s_2 = 4.650 - 4.575 = 0.075\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$,

$$\dot{S} = \dot{m}\Delta s = (5\text{kg/s})(0.075\text{kJ/kg}\cdot\text{K}) = 0.375\text{kW/K}$$

5. 152^D 10 lb_m/s 的 R12 在入口条件 40psia, 90°F 下被节流, 熵产速率是多少(Btu/s·°R)?

解 作为一个不可逆过程, 节流必然引起熵增. 从题 5. 63, 这个过程的两个等熵点是 (1) 150psia, 120°F; (2) 40psia, 90°F. 从表中可得到

$$s_1 = 0.1663\text{Btu/lbm}\cdot\text{°R}, s_2 = 0.1875\text{Btu/lbm}\cdot\text{°R}$$

因此节流包含了压强的减少, $\Delta s = s_2 - s_1 = 0.1875 - 0.1663 = 0.0194\text{Btu/lbm}\cdot\text{°R}$

$$\dot{S} = \dot{m}\Delta s = (10\text{lbm/s})(0.0194\text{Btu/lbm}\cdot\text{°R}) = 0.0194\text{Btu/s}\cdot\text{°R}$$

5. 153 300K 下的饱和蒸汽 R12 进入绝热压缩机. 出口处的制冷剂是 10bar, 320K 的过热蒸汽. 如果每分钟流过的流体质量是 5kg/min, 估计产生的熵(W/K).

解 在出口处的条件下, $s_2 = 4.557\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$; 在入口条件下, $s_1 = 4.548\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. 因此,

$$\dot{S} = \dot{m}(s_2 - s_1) = (5\text{kg/min})(0.009\text{kJ/kg}\cdot\text{K}) = 0.045\text{kJ/min}\cdot\text{K} = 7.5 \times 10^{-4}\text{kW/K} = 0.75\text{W/K}$$

5. 154^D R12 从 10bar, 50°C 被绝热节流到 1bar. (a) 出口处 R12 的温度是多少(°C)? (b) 焦耳-汤姆孙系数的平均值是多少(K/bar)? (c) 这个过程是不可逆的, 可逆的, 还是不可能的?

解 (a) 在 10bar, 50°C = 323. 15K 时, 表 C6 给出了

$$h_1 = 572.8 + (3.15/10)(580.3 - 572.8) = 575.2\text{kJ/kg} = h_2. \text{ 因此, 在 1bar 时,}$$

$$T_2 = 300 + [(575.2 - 572.1)/(578.2 - 572.1)](10) = 305.1\text{K} = 31.9^\circ\text{C}.$$

$$(b) \quad \mu = (\partial T / \partial P)_h \approx (\Delta T / \Delta P)_h = (305.1 - 323.2)/(1 - 10) = 2.01\text{K/bar}$$

(c) 在入口处, $s_1 = 4.557 + (3.15/10)(4.580 - 4.557) = 4.564\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$; 在出口处,

$$s_2 = 4.701 + (5.1/10)(4.721 - 4.701) = 4.711\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

这样, $\Delta s = 4.711 - 4.564 = 0.147\text{kJ/kg}\cdot\text{K} > 0$, 不可逆绝热过程的节流是可能的.

5. 155^D R12 从 150psia, 120°F 被绝热节流到 15psia. (a) 出口处 R12 的温度是多少(°F)? (b) 焦耳-汤姆孙系数的平均值是多少(°F/psia)? (c) 这个过程是不可逆的, 可逆的, 还是不可能的?

解 (a) 在 150psia, 120°F 时, 表 C5 给出了 $h_1 = 89.80\text{Btu/lbm} = h_2$. 因此, 在 15psia 时,

$$T_2 = 80 + [(89.80 - 89.38)/(92.35 - 89.38)](100 - 80) = 82.8^\circ\text{F}$$

$$(b) \quad \mu = (\partial T / \partial P)_h = (82.8 - 120)/(15 - 150) = 0.276^\circ\text{F/psia}$$

(c)在入口处, $s_1 = 0.1663 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; 在出口处,

$$s_2 = 0.2005 + (2.8/20)(0.2059 - 0.2005) = 0.2013 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

这样, $\Delta s = 0.2013 - 0.1663 = 0.0350 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} > 0$, 不可逆绝热过程的节流是可能的。

5. 156^D 在环境温度为 300K 时, 题 5. 88 的流动过程可能吗?

解 不可能。离开管子时 R12 的质量是 0.2841, 所以, 在 275K 时, $s_2 = (1 - 0.2841)(4.006) + (0.2841)(4.556) = 4.162 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。在入口条件下的熵是 $s_1 = 4.006 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 因此 $\Delta s_{R12} = 4.162 - 4.006 = 0.156 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

另一方面, R12 获得的热量是 141.4 kJ/kg。因此, $\Delta s_{\text{sur}} = -141.4/300 = -0.471 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。总熵的变化是 $-0.471 + 0.156 = -0.315 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。表明这是一个不可能的过程。

5. 157^D 在环境温度为 -35°F 时, 题 5. 89 的流动过程可能吗?

解 可能。离开管子时 R12 的质量是 0.502, 所以, 在 -10°F 时, $s_2 = (1 - 0.502)(0.0146) + (0.502)(0.1699) = 0.0925 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。在入口条件下的熵是 $s_1 = 0.1688 \text{ Btu/lb}_m$; 因此 $\Delta s_{R12} = 0.0925 - 0.1688 = -0.0763 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。

另一方面, R12 获得的热量是 35.9 Btu/lb_m。因此, $\Delta s_{\text{sur}} = 35.9/425 = 0.0845 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。总熵的变化是 $0.0845 - 0.0763 = 0.0082 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 。这标志着可能(不可逆)的过程。

5. 158^D 如果 50bar 状态下 10kg/s 的饱和液态水被绝热节流到 5bar, 熵产的速率是多少 (kW/K)?

解 对于绝热节流, $\Delta h = 0$ 。在初始条件下, $h_1 = 1154.4 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 2.921 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。在终了条件下, $h_2 = h_1 = 1154.4 \text{ kJ/kg}$, 这个值在饱和液体值(640.3 kJ/kg)和饱和蒸汽值(2748 kJ/kg)之间。因此 $h_{\text{max}} = 1154.4 = (1 - x_2)(640.3) + x_2(2748)$, 或者 $x_2 = 0.2439$ 。熵是 $s_{\text{max}} = (1 - 0.2439)(1.861) + (0.2439)(6.820) = 3.070 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。因此, 在节流过程中, $\Delta s = 3.070 - 2.921 = 0.149 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。 $\dot{S} = \dot{m}\Delta s = (10 \text{ kg/s})(0.149 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) = 1.49 \text{ kW/K}$ 。

5. 159^D 如果 500°F 状态下 25 lb_m/s 的饱和液态水被绝热节流到 300°F, 熵产的速率是多少 (Btu/s · °R)?

解 对于绝热节流, $\Delta h = 0$ 。在初始条件下, $h_1 = 487.8 \text{ Btu/lb}_m$, $s_1 = 0.689 \text{ Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$ 。在最终条件下, $h_2 = h_1 = 487.8 \text{ Btu/lb}_m$, 这个值在饱和液体值(269.7 Btu/lb_m)和饱和蒸汽的值(1180 Btu/lb_m)之间。因此 $h_{\text{max}} = 487.8 = (1 - x_2)(269.7) + x_2(1180)$, 或者 $x_2 = 0.2396$ 。熵是 $s_{\text{max}} = (1 - 0.2396)(0.437) + (0.2396)(1.635) = 1.152 \text{ Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$ 。因此, 在节流过程中, $\Delta s = 1.152 - 0.689 = 0.463 \text{ Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$ 。 $\dot{S} = \dot{m}\Delta s = (25 \text{ lb}_m/\text{s})(0.463 \text{ Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}) = 11.575 \text{ Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$ 。

5. 160 一个蒸汽涡轮机运行的入口条件是 100bar, 800K, 出口条件是 1bar, 400K。流过这个装置的流量为 10000kg/h, 其功率是 1.75MW。如果空气的温度是 300K, 计算熵产的速率(kW/K)。

解 稳定流体的功率方程是, 当能量的变化为零的时候, $\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m}\Delta h$ 。从表 A5, $\Delta h = 2370 - 3442 = -712 \text{ kJ/kg}$ 。因此, $\dot{Q} = \dot{m}\Delta h - \dot{W} = (10000/3600)(-712) - (-1.75 \times 10^3) = -228 \text{ kW}$ 。从以上式子可以得到 $\dot{S}_{\text{stm}} = (+228 \text{ kW})/(300\text{K}) = 0.760 \text{ kW/K}$ 。因为是水蒸气, $\dot{S}_{\text{urb}} = \dot{m}\Delta s = (10000/3600)(7.502 - 6.685) = 2.269 \text{ kW/K}$ 。这样, $\dot{S}_{\text{tot}} = \dot{S}_{\text{stm}} + \dot{S}_{\text{urb}} = 0.760 + 2.269 = 3.029 \text{ kW/K}$ 。

5. 161 1kg/s 的水蒸气在 10bar, 饱和蒸汽的状态下流进一个热交换器。在热交换器里放出能量, 变成 10bar, 20°C 的液体。水蒸气冷凝放出热量将 20kg/s 的空气流从 275K 加热到 290K。剩余能量从热交换器散发到周围的空气(温度也为 275K)中去。计算总的熵产速率(kW/K)。

解 记水蒸气进入热交换器时下标为 1, 离开时的液体下标为 2。从稳定流体能量方程, 冷凝过程释放能量的速率是 $\dot{Q} = \dot{m}(h_1 - h_2) = (1 \text{ kg/s})[(83.9 - 277.77) \text{ kJ/kg}] = -269.3 \text{ kW}$ 。这里, 表 A2 的值给出了 $h_2 = 70.7 + (3.15/10)(112.5 - 70.7) = 83.9 \text{ kJ/kg}$ 。注意, 压缩液体表中没有 20°C 时的值, 只能将水作为饱和态来计算。

通过空气流散发掉的热量可以近似由 $\dot{m}(h_2 - h_1)$ 给出. 当表中列出的焓可以使用的时候, 温度从 275 变化到 290K, 足够小, 可以将比热看成常数 $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此通过空气流散发热量的速度为 $\dot{m}c_p(T_2 - T_1) = (20)(1.005)(290 - 275) = 302 \text{ kW}$; 所以空气获得热量的速度为 $2693 - 302 = 2391 \text{ kW}$.

下面计算熵产速率. 用表 A4, $\dot{S}_{\text{H}_2\text{O}} - \dot{m}(s_2 - s_1) = (1 \text{ kg/s})[(0.296 - 6.584) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] = -6.29 \text{ kW/K}$. 这里, 通过插值法可得到, $s_2 = 0.251 + (3.15/10)(0.393 - 0.251) = 0.296 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 由于没有给出任何空气流压强变化的信息, 必须假定空气压强是常数; 因此, Tds 方程给出了 $\dot{S}_{\text{stream}} - \dot{m}c_p \ln(T_2/T_1) = (20 \text{ kg/s})(1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) \ln(290/275) = 1.07 \text{ kW/K}$. 对于周围的空气 $\dot{S}_{\text{atm}} = (2391 \text{ kW})/(275 \text{ K}) = 8.69 \text{ kW/K}$. 最后, $\dot{S}_{\text{net}} = \dot{S}_{\text{H}_2\text{O}} + \dot{S}_{\text{stream}} + \dot{S}_{\text{atm}} = -6.29 + 1.07 + 8.69 = 3.47 \text{ kW/K}$.

5. 162^D 对于题 5. 131 里的系统, 计算下列熵变化的速度 ($\text{kJ/min} \cdot \text{K}$): (a) R12 从点 1 变化到点 2; (b) 空气从点 3 变化到点 4; (c) 整个系统.

解 (a) R12 在出口处的条件下 (点 2) 是气液混合物, 在 250K 时, 比焓为 398.7 kJ/kg . 干度可通过以下方程算出 $398.7 = (1 - x_2)(378.5) + x_2(514.5)$; 这样 $x_2 = 0.1239$. 因此,

$$s_2 = (1 - x_2)s_{f2} + x_2s_{g2} = (1 - 0.1239)(3.918) + (0.1239)(4.570) = 3.999 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

进入的饱和液体 R12 的熵是 $3.918 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 所以

$$\dot{S}_{\text{R12}} = \dot{m}\Delta s = (5 \text{ kg/min})[(3.999 - 3.918) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] = 0.405 \text{ kJ/min} \cdot \text{K}$$

(b) 对于空气, $\dot{S}_{\text{air}} = \dot{m}\Delta s = (1 \text{ kg/min})[(6.867 - 7.157) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] = -0.290 \text{ kJ/min} \cdot \text{K}$. [注意到由于空气流的压强 5 bar, 是一个常数, 在 Tds 方程里, $R \ln P_2/P_1$ 这一项没有了.]

(c) $\dot{S}_{\text{net}} = 0.405 - 0.290 = 0.115 \text{ kJ/min} \cdot \text{K}$

5. 163^D 对于题 5. 132 里的系统, 计算下列熵变速度 ($\text{Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$): (a) 空气从点 1 变化到点 2; (b) R12 从点 3 变化到点 4; (c) 整个系统.

解 (a) R12 在出口处的条件下 (点 2) 是气液混合物, 在 300psia 时, 比焓为 83.54 Btu/lb_m . 干度可通过以下方程算出 $83.54 = (1 - x_2)(48.41) + x_2(91.24)$; 这样 $x_2 = 0.8202$. 因此, $s_2 = (1 - x_2)s_{f2} + x_2s_{g2} = (1 - 0.8202)(0.0917) + (0.8202)(0.1601) = 0.1478 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 进入的饱和液体 R12 的熵是 $0.1601 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 所以 $\dot{S}_{\text{R12}} = \dot{m}\Delta s = (0.5 \text{ lb}_m/\text{s})[(0.1478 - 0.1601) \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}] = -0.0062 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

(b) 对于空气, $\dot{S}_{\text{air}} = \dot{m}\Delta s = (0.101 \text{ lb}_m/\text{s})[(1.6736 - 1.6017) \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}] = 0.0072 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.

(c) $\dot{S}_{\text{net}} = 0.0072 - 0.0062 = 0.0010 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$

5. 164^D 题 5. 133 里的混合过程熵产是多少 (kW/K)?

解 对出口处的温度进行插值计算, 可以得到 20 kg/s 的水蒸气熵的变化为 $\dot{m}\Delta s = (20 \text{ kg/s})[(0.370 - 1.192) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] = -16.44 \text{ kW/K}$; 250 kg/s 的水蒸气熵的变化为 $(250 \text{ kg/s})[(0.370 - 0.296) \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}] = 18.50 \text{ kW/K}$. 因此总熵产是 $18.50 - 16.44 = 2.06 \text{ kW/K}$. 正号与混合过程是不可逆过程的一般结论一致.

5. 165^D 题 5. 134 里的混合过程的熵产是多少 ($\text{Btu/s} \cdot ^\circ\text{R}$)?

解 对出口处的温度 77.3°F 进行插值计算, 可以得到 $50 \text{ lb}_m/\text{s}$ 的水蒸气熵的变化为 $\dot{m}\Delta s = (50 \text{ lb}_m/\text{s})[(0.089 - 0.294) \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}] = -10.25 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$; $500 \text{ lb}_m/\text{s}$ 的水蒸气熵的变化为 $(500)(0.089 - 0.066) = 11.50 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 因此总熵产是 $11.50 - 10.25 = 1.25 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 正号与混合过程是不可逆过程的一般结论一致.

5. 166 空气流过一个完全绝热的管子. 在点 1 和点 2 处测得的空气压强和温度由下表给出. 推断空气在管子里的流向. 假定 $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $R = 0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.

	1	2
压力/bar	1.5	1.0
温度/ $^\circ\text{C}$	50	15

解 流动的方向是沿着熵变非负方向. 假设流体从 1 到 2, 题 2. 325 给出 $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) -$

$R \ln(P_2/P_1) = 1.005 \ln(288/323) - 0.287 \ln(1/1.5) = 0.0011 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因为这是个正值, 应该用空气表来检验:

$$\Delta s = (s_2^0 - s_1^0) - R \ln(P_2/P_1) = (6.826 - 6.942) - 0.287 \ln(1/1.5) = 0.000 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

我们可以推断它或者是从 1 到 2 的临界不可逆流动或者是可逆流动(通过任意一条途径).

不稳定流动

5.167 写出不稳定流动的普适方程.

解 $dQ + dW + \sum(h_i + ke_i + gpe_i + \dots) dm_i = dU + d(KE) + d(GPE) + \dots$

这里求和遍及所有流体.

5.168 液体(不稳定地)从刚性、绝热水箱中流出. 假设动能与势能可以忽略, 水箱中充满液体, 证明在水箱中的流体遵守 $du + Pdv = 0$.

解 能量普适方程化为 $h dm = dU$, 或 $(u + Pv) dm = d(mu) = m du + u dm$, 或 $du - Pv(dm/m) = 0$. 但是 $m = V/v = \text{常数}/v$, 因此 $dm/m = -(dv/v)$. 相应地, $du + Pdv = 0$.

5.169 (a) 对题 5.168 中推导出的能量方程积分, 假设流体是理想气体; (b) 讨论(a)中等熵时的结果.

解 (a) 对于理想气体, $du = c_v dT$ 和 $Pdv = d(Pv) - v dP = R dT - (RT/P) dP$. 这样,

$$\begin{aligned} du + Pdv &= 0 \\ (c_v + R)dT - RT \frac{dP}{P} &= 0 \\ c_p dT - (c_p - c_v)T \frac{dP}{P} &= 0 \\ \frac{dT}{T} + \frac{1-k}{k} \frac{dP}{P} &= 0 \\ \ln T + \frac{1-k}{k} \ln P &= \text{常数} \\ TP^{(1-k)/k} &= \text{常数} \end{aligned} \quad (1)$$

(b) (1) 式与题 2.329 比较, 易知与等熵过程的 P - T 关系具有相同的形式. 然而, 所给流体不是等熵的(即不可逆的). 事实上, 对应于(1)式的 P - V 关系为

$$PV^k = \text{常数} \times m^k \quad (2)$$

并且质量是变化的. 可看出, 对于一定的体积, (2)式表明 $m \propto P^{1/k}$.

5.170 贮存在体积为 V 的刚性容器中的理想气体初始时压强为 P_1 , 温度为 T_1 , 同时发生两个过程: 气体缓慢逸出, 并不断给气体加热, 使容器内压强在质量减少的情况下仍保持不变, 试求 Q 关于终了温度 T_2 和其他参数的表达式.

解 能量普适方程(题 5.167)化为 $dQ = h dm = dU$. 正如在题 5.168 中推导的一样, 我们把它转化为 $dQ = m(du + Pdv) = m dh$, 这里最后一步利用 $P = \text{常数}$ 得到. 但是, 对于理想气体, $m = m_1(T_1/T)$, 这里 m_1 是初始质量, $dh = c_p dT$. 这样,

$$Q = \int m dh = m_1 c_p T_1 \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = m_1 c_p T_1 \ln \frac{T_2}{T_1}$$

5.171^D 贮存在体积为 1 m^3 的刚性容器中的 10 kg 理想气体, 初始时温度为 300 K . 有缓慢漏气, 不断给容器加热使其中气体保持初始压强不变. 若终了温度为 500 K , 试求: (a) 所需增加的热量(kJ); (b) 逸出空气的质量(kg).

解 (a) 假设是理想过程, 可利用在题 5.170 中推导的公式得到

$$Q = (10 \text{ kg})(1.013 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(300 \text{ K}) \ln \frac{500}{300} = 1553 \text{ kJ}$$

(b) 由于 $m_2 = m_1(T_1/T_2)$,

$$m_1 - m_2 = m_1 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) = (10 \text{ kg}) \left(1 - \frac{300}{500}\right) = 4 \text{ kg}$$

- 5.172^D 20 lb_m, 80°F 的空气贮存在体积为 20 ft³ 的刚性容器中. 有缓慢漏气, 不断给容器加热使槽中气体保持初始压强不变. 若终温为 300 K, 试求: (a) 所加的热量 (Btu); (b) 逸出空气的质量 (lb_m).

解 (a) 假设是理想过程, 可利用在题 5.170 中推导的公式得到

$$Q = (20 \text{ lb}_m) (0.2411 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) (540 ^\circ\text{R}) \ln \frac{760}{540} = 30.72 \text{ Btu}$$

(b) 由于 $m_2 = m_1 (T_1/T_2)$,

$$m_1 - m_2 = m_1 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right) = (20 \text{ lb}_m) \left(1 - \frac{540}{760}\right) = 5.79 \text{ lb}_m$$

- 5.173 贮存在体积为 V 的刚性容器中的理想气体, 初始压强 P_1 , 温度 T_1 , 气体缓慢膨胀, 通过加热保持容器温度不变, 压强降为 P_2 , 导出 Q 关于 P_1 和 P_2 和其他参数的表达式.

解 如题 5.170 一样得到方程 $dQ = m(du + Pdv)$, 在常温下, $du = 0$ 且 $0 = d(RT) = d(Pv) = Pdv + vdP$. 因此, $dQ = -mvdP = -VdP$, 或 $Q = V(P_1 - P_2)$.

- 5.174^D 一个 10 m³ 的容器中有 300 K, 10 bar 的空气, 经过几天压强降为 1 bar. 容器吸收了多少热量 (kJ)? 假设是理想气体.

解 几天时间应被假设为时间足够长以至于容器的温度保持不变. 那么, 根据题 5.173,

$$Q = V(P_1 - P_2) = (10 \text{ m}^3) (900 \text{ kPa}) = 9000 \text{ kJ}$$

- 5.175^D 一个 10 m³ 的容器中有 150 psia, 80°F 的空气, 经过几天压强降为 15 psia. 容器吸收了多少热量 (Btu)?

解 几天时间应被假设为时间足够长以至于容器的温度保持不变. 那么, 根据题 5.173,

$$Q = V(P_1 - P_2) = (100 \text{ ft}^3) (135 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2) (778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 2499 \text{ Btu}$$

- 5.176 如图 5-17, 气缸 A 和气缸 B 相连. 气缸 A 是刚性的, 体积为 0.1 m³, 盛有 6 bar, 300 K 状态下的理想气体, 其 $R = 0.5 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $k = 1.3$. 气缸 B 是垂直的, 装有一个重的无摩擦力的密封活塞. 气缸里的绝对压强为 2 bar 时才能平衡掉活塞的重力, 外界压强是 1 bar. 初始时刻活塞在气缸的底部, 气缸和它相连的管子都是绝热的, 用来连接整个系统并且与管子相连的阀门是打开的, 它连接整个系统, 以达到机械平衡. 计算: (a) 气缸 A 和气缸 B 中最后的温度; (b) 活塞增加的势能.

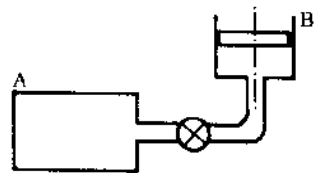


图 5-17

解 (a) A 中的气体膨胀到 2 bar, 根据题 5.169 (a), $TP^{(1-k)/k} = \text{常数}$, 得到 $(300) 6^{-0.3/1.3} = T_{A2} 2^{-0.3/1.3}$, 因此 $T_{A2} = 232.8 \text{ K}$.

因为两个气缸都是绝热的, 从 A 到 B 又是自由膨胀, 做的功仅仅用来提高活塞的位置. 对整个系统用第一定律可得到

$$W_B = \Delta U \quad (1)$$

$W_{B2} = - \int_0^{V_{B2}} P_B dV_B = -P_B V_{B2} = -m_{B2} R T_{B2}$. 另一方面, 将绝对零度作为一个参考温度,

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U_A + \Delta U_B = m_{A2} c_v T_{A2} - m_{A1} c_v T_{A1} + m_{B2} c_v T_{B2} \\ &= c_v \frac{V_A}{R} (P_{A2} - P_{A1}) + m_{B2} c_v T_{B2} \end{aligned}$$

将这个结果代入 (1) 式, 并且用 $c_p = c_v + R$, 可得到

$$m_{B2} R T_{B2} = \frac{V_A (P_{A1} - P_{A2})}{k} \quad (2)$$

但是, 根据质量守恒, $m_{B2} = m_{A1} - m_{A2}$, 或者

$$m_{B2} R = V_A \left(\frac{P_{A1}}{T_{A1}} - \frac{P_{A2}}{T_{A2}} \right) \quad (3)$$

把式 (3) 代入式 (2), 得

$$T_{B2} = \frac{(P_{A1} - P_{A2})T_{A1}T_{A2}}{k(P_{A1}T_{A2} - P_{A2}T_{A1})} = \frac{(6-2)(300)(232.8)}{(1.3)[(6)(232.8) - (2)(300)]} = 269.6\text{K}$$

(b) 气体对活塞做的功 $= -W_B = V_A(P_{A1} - P_{A2})/k = (0.1\text{m}^3)(400\text{kPa})/1.3 = 30.76\text{kJ}$; 空气对活塞做的功 $= -P_{\text{atm}}V_{B2} = (P_{\text{atm}}/P_{B2})W_B = (1/2)W_B$;

作用于活塞的净功 $= -(1/2)W_B = 15.38\text{kJ} = \text{GPE 的增加}$ 。

- 5.177^D 两个绝热容器 A 和 B 通过一个阀门连接。A 的体积为 1m^3 , 并且盛有 50bar, 400K 状态下的空气。容器 B 的体积为 5m^3 , 并且盛有 1bar, 300K 状态下的空气。当容器 A 的压强减为一半时, 阀门打开; 然后又被关闭。这时, 求: (a) 容器 A 中的温度(K); (b) 容器 B 中的温度(K); (c) 容器 B 中的压强(bar)。假设空气是理想气体。

解 因为容器是绝热, 所以这个过程是绝热过程。由于自由膨胀不做功, 根据热力学第一定律, $\Delta U = 0$ 。

(a) 据题 5.169 式(1),

$$T_{A2} = T_{A1}(P_{A1}/P_{A2})^{(1-k)/k} = 400(50/25)^{-0.17/0.17} = 328.1\text{K}$$

(b) 开始时容器 A 中气体的质量是

$$m_{A1} = MP_{A1}V_A/(R_U T_{A1}) = (28.97)(50)(1)/(0.08314)(400) = 43.56\text{kg}$$

膨胀后,

$$m_{A2} = MP_{A2}V_A/(R_U T_{A2}) = (28.97)(25)(1)/(0.08314)(328.1) = 26.55\text{kg}$$

因此, $43.56 - 26.55 = 15.01\text{kg}$ 是从 A 进入到 B 中去的质量。开始时容器 B 中气体的质量是

$$m_{B1} = MP_{B1}V_B/(R_U T_{B1}) = (28.97)(1)(5)/(0.08314)(300) = 5.81\text{kg}$$

因此, 最后 B 中气体的质量是 $m_{B2} = 5.81 + 15.01 = 20.82\text{kg}$ 。

因为内部没有能量交换, $0 = (\Delta U_A + \Delta U_B)/c_v = m_{A2}T_{A2} - m_{A1}T_{A1} + m_{B2}T_{B2} - m_{B1}T_{B1}$ 。代入已知数据 $(26.55)(328.1) - (43.56)(400) + 20.82T_{B2} - (5.81)(300) = 0$, 或者 $T_{B2} = 502.21\text{K}$ 。

(c) $P_{B2} = m_{B2}R_U T_{B2}/MV_B = (20.82)(0.08314)(502.21)/(28.97)(5) = 6.00\text{bar}$

- 5.178^D 两个绝热容器 A 和 B 通过一个阀门连接。A 的体积为 10ft^3 , 并且盛有 500psia, 500°F 状态下的空气。容器 B 的体积为 50ft^3 , 并且盛有 15psia, 50°F 状态下的空气。当容器 A 的压强减为一半时, 阀门打开; 然后又被关闭。这时, 求: (a) 容器 A 中的温度($^\circ\text{F}$); (b) 容器 B 中的温度($^\circ\text{F}$); (c) 容器 B 中的压强(psia)。假设空气是理想气体。

解 因为容器是绝热的, 所以这个过程是绝热过程。由于自由膨胀不做功, 根据热力学第一定律, $\Delta U = 0$ 。

(a) 根据题 5.169 式(1),

$$T_{A2} = T_{A1}(P_{A1}/P_{A2})^{(1-k)/k} = 960(500/250)^{-0.4/1.4} = 787.5^\circ\text{R} = 328^\circ\text{F}$$

(b) 开始时容器 A 中气体的质量是

$$m_{A1} = MP_{A1}V_A/(R_U T_{A1}) = (28.97)(500)(144)(10)/(1545)(960) = 14.063\text{lb}_m$$

膨胀后,

$$m_{A2} = MP_{A2}V_A/(R_U T_{A2}) = (28.97)(250)(144)(10)/(1545)(787.5) = 8.572\text{lb}_m$$

因此, $14.063 - 8.572 = 5.491\text{lb}_m$ 是从 A 进入到 B 中去的质量。开始时容器 B 中气体的质量是

$$m_{B1} = MP_{B1}V_B/(R_U T_{B1}) = (28.97)(15)(144)(50)/(1545)(510) = 3.971\text{lb}_m$$

因此, 最后 B 中气体的质量是 $m_{B2} = 3.971 + 5.491 = 9.462\text{lb}_m$ 。

因为内部没有能量交换, $0 = (\Delta U_A + \Delta U_B)/c_v = m_{A2}T_{A2} - m_{A1}T_{A1} + m_{B2}T_{B2} - m_{B1}T_{B1}$ 。

代入已知数据

$$(8.572)(787.5) - (14.063)(960) + 9.462T_{B2} - (3.971)(510) = 0$$

或者 $T_{B2} = 927.4^\circ\text{R} = 468^\circ\text{F}$ 。

(c) $P_{B2} = m_{B2}R_U T_{B2}/MV_B$

$$= (9.462)(1545)(927.4)/(28.97)(50) = 9360\text{lb}_f/\text{ft}^2 = 65.0\text{psia}$$

- 5.179 一只刚性的加有外套的容器体积为 10m^3 , 初始的时候盛有 100kg 的蒸汽和水, 压强为 5bar。一初始关闭的带有阀门的管子, 将容器连接到一个充满 20bar, 600K 蒸汽的气锅炉上。阀门打开让水蒸气进入容器。在达到平衡之后计算容器里水和蒸汽的质量。

解 对于一个绝热过程, 不做功, 能量方程简化为 $h\Delta m = \Delta U$, 或

$$h_0(m_2 - m_1) = m_2 u_2 - m_1 u_1 \quad (1)$$

如果 x_2 是混合物最后的干度,

$$u_2 = u_{f2} + x_2 u_{fg2} \quad (2)$$

类似的, 因为 $V = m_2 v_2$ 是恒定的体积,

$$V = m_2 (v_{f2} + x_2 v_{fg2}) \quad (3)$$

通过式(1)(2)(3)消去 u_2, x_2 , 可得到

$$m_2 = \frac{V(u_{fg2}/v_{fg2}) + m_1(h_0 - u_1)}{h_0 - u_{f2} + v_{f2}(u_{fg2}/v_{fg2})}$$

通过表 A4 计算, 可得到

$$m_2 = \frac{10(1692/0.0988) + (100)(3087 - 640)}{3087 - 906 + (1.177 \times 10^{-3})(1692/0.0988)} = 189 \text{ kg}$$

- 5. 180^D** 状态为 500kPa, 20°C 的空气盛在 5L 的瓶子(A)中, 15L 的瓶子(B)中盛有 20000kPa, 20°C 的空气. 将(B)中的气体充入(A)中直到(A)中压强达到最大. 计算在 A 瓶充满之后, A 中空气的质量. 假设变化过程足够慢, 两个瓶子中的气体都保持在 20°C. (假设理想气体, $R = 0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$.)

解 开始的时候, $m_{A1} = P_{A1} V_A / (RT_{A1}) = (500)(5 \times 10^{-3}) / (0.287)(293.2) = 0.030 \text{ kg}$ 和 $m_{B1} = P_{B1} V_B / (RT_{B1}) = (20000)(15 \times 10^{-3}) / (0.287)(293.2) = 3.564 \text{ kg}$. 当两个瓶子中的压强相等时, 质量 $m_3 = 3.564 + 0.030 = 3.594 \text{ kg}$. 占有的体积为 $V_3 = 5 + 15 = 20 \text{ L}$. 那么, 根据理想气体定律,

$$m_{A2} = (V_A / V_3) m_3 = (5/20)(3.594) = 0.899 \text{ kg}$$

- 5. 181^D** 如果题 5. 180 中的过程不是等温的而是绝热的, 重解题 5. 180.

解 根据理想气体的绝热自由膨胀, $\Delta U = (k-1)^{-1} \Delta(PV) = 0$; 那么, $(P_3 - P_{A1})V_A + (P_3 - P_{B1})V_B = 0$, 或

$$P_3 = \frac{V_A}{V_A + V_B} P_{A1} + \frac{V_B}{V_A + V_B} P_{B1} = \frac{5}{20}(500) + \frac{15}{20}(20000) = 15125 \text{ kPa}$$

题 5. 169(b) 给出[从题 5. 180 中取 m_{B1}]

$$m_{B2} = m_{B1} \left(\frac{P_3}{P_{B1}} \right)^{1/k} = (3.564) \left(\frac{15125}{20000} \right)^{1/1.4} = 2.920 \text{ kg}$$

所以,

$$m_{A2} = m_3 - m_{B2} = 3.594 - 2.920 = 0.674 \text{ kg}$$

- 5. 182^D** 1ft³ 的汽缸(A)中的空气为 50psia, 80°F. 10ft³ 的瓶子(B)中盛有 2000psia, 80°F 的空气. 将(B)中的气体充入(A)中直到(A)中压强达到最大. 计算在 A 瓶充满之后, A 中空气的质量. 假设变化过程足够慢, 两个瓶子中的气体都保持在 80°F. (假设理想气体, $R = 53.35 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$.)

解 初始时, $m_{A1} = P_{A1} V_A / (RT_{A1}) = (50 \times 144)(1) / (53.35)(540) = 0.25 \text{ lb}_m$ 和 $m_{B1} = P_{B1} V_B / (RT_{B1}) = (2000 \times 144)(10) / (53.35)(540) = 100 \text{ lb}_m$. 当两个瓶子中的压强相等时, $m_3 = 100 + 0.25 = 100.25 \text{ lb}_m$. 占有的体积为 $V_3 = 10 + 1 = 11 \text{ ft}^3$. 那么, 根据理想气体定律,

$$m_{A2} = (V_A / V_3) m_3 = (1/11)(100.25) = 9.11 \text{ lb}_m$$

- 5. 183^D** 如果题 5. 182 中的过程不是等温的而是绝热的, 重解题 5. 182.

解 对于理想气体的绝热自由膨胀, $\Delta U = (k-1)^{-1} \Delta(PV) = 0$; 那么,

$$(P_3 - P_{A1})V_A + (P_3 - P_{B1})V_B = 0$$

或

$$P_3 = \frac{V_A}{V_A + V_B} P_{A1} + \frac{V_B}{V_A + V_B} P_{B1} = \frac{1}{11}(50) + \frac{10}{11}(2000) = 1823 \text{ psia}$$

现在题 5. 169(b) 给出[从题 5. 182 取 m_{B1} 的值]

$$m_{B2} = m_{B1} \left(\frac{P_3}{P_{B1}} \right)^{1/k} = (100) \left(\frac{1823}{2000} \right)^{1/1.4} = 93.60 \text{ lb}_m$$

所以,

$$m_{A2} = m_3 - m_{B2} = 100.25 - 93.60 = 6.65 \text{ lb}_m$$

- 5. 184^D** 气体被盛在一个刚性的, 不绝热的容器中, 容器的体积为 V , 气体的压强是 P_1 . 气体

通过一个阀门慢慢释放,压强降为 P_2 . 证明这个过程中吸收的热量

$$Q = V \left[\int_1^2 \frac{dh}{v} + (P_1 - P_2) \right]$$

解 [参见题 5.173] 不稳定流动能量方程是 $dQ + hdm = dU$. 我们可以对容器中的气体应用这个方程: 阀门中的等焓节流过程(假设是等焓的)将引起外面焓的变化, 从而反映里面焓的变化. 容器的体积是一个常数,

$$dU = d(H - PV) = dH - VdP = hdm + mdh - VdP = hdm + (V/v)dh - VdP$$

那么, $dQ = V(dh/v - dP)$, 通过积分可以求得结果.

各种小题

- 5.185 一个完全绝热的热交换器, 流体 A 通过该装置的时候, 焓增加了. B 流体的焓将怎么变化?

解 对于完全绝热的热交换器 $Q=0, W=0, \Delta KE, \Delta GPE$ 都必须假设为零. 因此 $\Delta H=0$, 这就证明了流体 B 的焓必须减少.

- 5.186 一个气体压缩机的功率为 240kW. 如果流量是 90kg/min, 求输入的轴功(kJ/kg).

解 比功是功率除以流量; 因此, $w = (240\text{kW}) / [(90/60)\text{kg/s}] = 160\text{kJ/kg}$.

- 5.187 在绝热的气体压缩机中, 排气温度是高于还是低于吸气温度?

解 通常稳定流动的简化方程是 $W = \Delta H$. 对于压缩机 W 是正的, H 是 T 的增函数, ΔT 必须是正的; 即 $T_{\text{out}} > T_{\text{in}}$.

- 5.188 一个涡轮机里, 沿流动方向, 焓是增加, 保持不变, 还是减少?

解 稳定流体的能量方程是 $Q + W = \Delta H + \Delta KE$, 根据一般假设 $\Delta GPE = 0$. 因为该装置是涡轮机, 所以 $W < 0$. 通常通过该装置的时候流速减小; $\Delta KE < 0$. 因为该装置是放热的, 所以 $Q < 0$. 因为 $Q + W$ 和 ΔKE 比是主要的, 因此我们可以判断 $\Delta H < 0$ (通常情况).

- 5.189 一个涡轮机流量为 2.2 lb_m/s, 做功是 93 Btu/lb_m. 计算输出功率(hp).

解 $(93 \text{ Btu/lb}_m)(2.2 \text{ lb}_m/\text{s})(3600\text{s/hr}) / (2545 \text{ Btu/hp} \cdot \text{hr}) = 289.4 \text{ hp}$

- 5.190 在一个喷管中, 沿流动方向压强怎么变化?

解 会增加, 因为流体的速度减小了.

- 5.191 流体以很小的可忽略的速度流过喷管. 通过喷管时焓的改变是 -1 Btu/lb_m. 求出口的速度(ft/s).

$$\Delta h + \Delta KE = -1 + \frac{\bar{v}_2^2}{50000} = 0$$

解 稳定流动比能方程给出了 $\Delta h + \Delta KE = 0$, 因此 $\bar{v}_2 = 224 \text{ ft/s}$.

- 5.192 制冷剂 R12 在 10bar, 320K 的状态下进入绝热涡轮机. 据推测在出口处致冷剂的状态是 300K 的饱和气体. 评价这个推测.

解 验证熵的变化. 在涡轮机的入口处, $s_1 = 4.557 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 在出口处 $s_2 = 4.548 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此 $\Delta s = s_2 - s_1 = 4.548 - 4.557 = -0.009 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 忽略掉误差可以认为结果 $\Delta s = 0.0000$. 这就要求涡轮机是一个理想的可逆涡轮机. 但这是不可能的, 所以推测必然是错的.

- 5.193 一不可压缩流体用一个效率低于 100% 的等熵过程通过一个泵. 泵所需要的功小于, 等于还是大于等熵压缩所需要的功?

解 大于.

- 5.194 一不可压缩流体流过一个刚性、完全绝热的水平管, 管子直径为常数. 根据测量, 出口处的压强低于入口处的压强. 当流体通过管子的时候, 它的温度升高还是降低?

解 稳定流动比能方程简化为 $\Delta h = 0$. 但是, 在常数为 v 的时候(不可压缩), $\Delta h = \Delta u + v\Delta P$; 因此, $\Delta u = v(-\Delta P) > 0$, 这就暗示着 $\Delta T > 0$.

- 5.195 一不可压缩流体用一个不可逆过程通过一个绝热管. 流体的温度是升高还是降低?

解 对于一个不可逆过程 $\Delta s > 0$. 但是对于不可压缩流体 $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$. 那么, $T_2 > T_1$.

- 5.196 一不可压缩流体流过一个直径为常数的管子. 由于摩擦力的影响出口处的压强低于入口处的压强. 出口处的速度和入口处的速度的关系是什么?

解 根据连续性方程, $\bar{v} = \text{常数}$.

- 5.197 一不可压缩流体经过节流过程通过一个绝热阀门. 如果出口处的压强低于入口处的压强, 求通过阀门的时候温度的变化.

解 节流过程是等熵的; 所以, 根据题 5.194, $\Delta u = v(-\Delta P) > 0$, 这包含 $\Delta T > 0$.

- 5.198 一不可压缩流体通过一个控制体, 这个过程中 $A_1 > A_2$. 求 \bar{v}_1 和 \bar{v}_2 的关系.

解 根据连续性方程, $\bar{v}_1/\bar{v}_2 = A_2/A_1 < 1$.

- 5.199 一不可压缩流体经过可逆过程流过一稳流装置, 动能和势能的变化可忽略. 这个装置对外做功. 通过这个装置后压强增加还是减少?

解 功的方程是 $w = \Delta h$ ($q = T\Delta s = 0$, 根据可逆性质). 对于不可压缩流体, $\Delta s = 0$ 包含了 $\Delta T = 0$; 因此 $w = \Delta h = v\Delta P$, 或者 $\Delta P = w/v < 0$ (对外做功), 压强减小.

- 5.200 写出题 5.199 中装置对外做功的表达式.

解 令 \dot{V} 是恒定的体积流量. 那么 $\dot{W} = \dot{m}w = (\dot{V}/v)(v\Delta P) = \dot{V}\Delta P$.

- 5.201 稳流过程中理想气体的膨胀是等熵的. 在 P - v 图上画出理想气体的等熵曲线, 并指出从状态 1 到状态 2 的膨胀过程中代表对外做功的面积.

解 见图 5-3. 对于一个等熵过程, $Pv^k = \text{常数}$. 所以曲线比双曲线要陡. 阴影部分代表所做的功.

- 5.202 当一不可压缩流体保持温度不变时, 下面的参数 P , v , h 和 u , 哪些是常数?

解 v 和 u .

- 5.203 理想气体在稳流涡轮机中绝热膨胀. 动能和势能的改变可忽略. 求温度改变的符号.

解 比能方程简化为 $w = \Delta h$. 由于涡轮机做功, $w < 0$; 对于理想气体, 焓是温度的增函数. 因此, $\Delta T < 0$.

- 5.204 理想气体稳定、等温流过一个直径为常数的管子. 出口的压强高于入口的压强. (a) 求出口和入口速度的关系; (b) 什么装置可达到这个效果?

解 (a) 由连续性, $\bar{v}P = \text{常数}$; 所以 $\bar{v}_{in} > \bar{v}_{out}$.

(b) 扩散管 (对于亚音速流动) 或者喷管 (对于超音速流动).

- 5.205 证明当不可压缩流体通过绝热阀节流后温度升高.

解 这个过程遵循 $\Delta h = 0$. 现在, 对于不可压缩流体, $\Delta h = c\Delta T + v\Delta P$. 因为 ΔP 肯定是负数, 所以 ΔT 必然是正的.

第六章 卡诺循环

6.1 列出热机基本的三个组成部分.

解 高温热源、热机本身、低温热源.

6.2 对于热机中这些组成部件,我们通常作哪些假设?

解 高温热源的温度 T_h 和低温热源的温度 T_l 保持不变,且两个热源具有无限大的热容量.

6.3 热机的工作遵守哪些物理定律?

解 热力学第一、第二定律.

6.4 简述热机是如何遵守第一、第二定律的.

解 第一定律认为,热机吸收的热量(Q_h)一定等于热机对外做的净功(W_{net})与热机释放给低温热源的热量(Q_c)之和,数学表达式为: $Q_h = W_{\text{net}} + Q_c$,或 $\sum Q \equiv Q_h - W_{\text{net}} - Q_c = 0$.第二定律决定了能量流动的方向,其克劳修斯表述为:不可能制造出这样一种循环工作的机器,它只使热量从低温物体传到高温物体而不引起其他变化.

6.5 写出第二定律的开尔文-普朗克表述.

解 “不可能制造出这样一种循环工作的热机,只从单一热源吸收热量,使它完全转变为功,而不引起其他变化.”

6.6 克劳修斯和开尔文-普朗克表述是否等效?

解 是.利用卡诺理论逻辑(题6.35),可以证明这两种表述是等效的.

6.7 第二定律以什么为基础?

解 以大量实验为基础.理论上讲,这个定律可以推翻,但推翻的可能性几乎为零.

6.8 第二定律的任何一种表述都陈述了一种不可能性,那么在实际当中如何应用这个定律呢?

解 比较实际热机和理想(卡诺)热机的特性,或者比较实际和理论的熵变.

6.9 画出热机的结构图.

解 如图6-1.

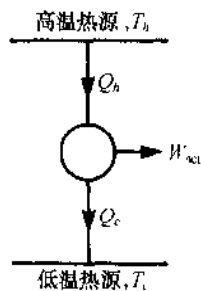


图 6-1

6.10 什么是卡诺热机?

解 卡诺热机是一个效率最高并且遵守第一、第二定律的热机.就是说,如果卡诺热机吸热 Q_h ,最大输出功率为 W_{net} ,那么 $Q_h/T_h = Q_c/T_c$.

6.11 卡诺热机效率的定义.

解 任何热机的效率定义为 $\eta = W_{\text{net}}/Q_h = 1 - Q_c/Q_h$.对卡诺热机则为 $\eta^* = 1 - T_c/T_h$,这里 T_c , T_h 都是绝对温度.

6.12 净功(W_{net})与效率 η 之间的关系是什么?

解
$$\eta = W_{\text{net}}/Q_h$$

6.13 描述在卡诺循环中理想的活塞-气缸装置是如何操作的.

解 如图6-2,气缸底部导热性能非常好,其侧面和活塞均绝热.活塞和气缸之间无摩擦、无漏热,这个设备中的工质通常为气体.操作程序如下(步骤如图6-3):

1. 将此设备放在高温热源上,工作流体的状态参量为 P_1, V_1, T_1 .
2. 将砝码慢慢地从高温热源上移走,因此气体经历了一个等温膨胀过程 $1 \rightarrow 2$.

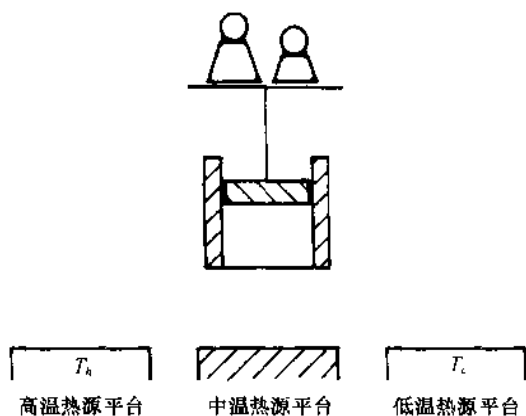


图 6-2

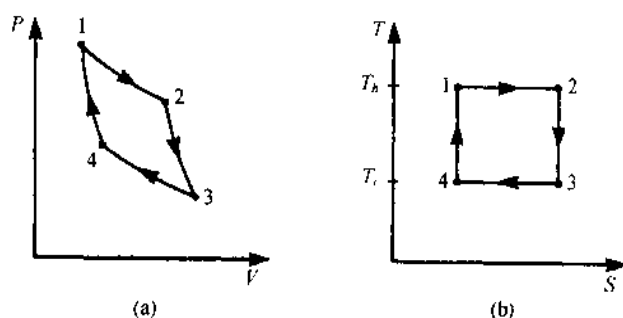


图 6-3

3. 将此设备放在中温热源上,将砝码迅速地从此平台上移走,气体经历了一个绝热膨胀过程 $2 \rightarrow 3$.
4. 将此系统放在低温热源上,将砝码慢慢地移到平台上,气体则经历了一个等温压缩过程 $3 \rightarrow 4$.
5. 将此系统放在中温热源上,将砝码迅速地移到平台上,这是一个绝热压缩过程,如果膨胀和压缩的程度刚好相等,这一绝热过程将使系统从点 4 又回到原来的状态点 1.

6.14 仔细分析图 6-3(a),用阴影表示:(a)系统压缩所输入的功;(b)系统膨胀而输出的功;(c)一个完整的卡诺循环的净功。

解 如图 6-4.

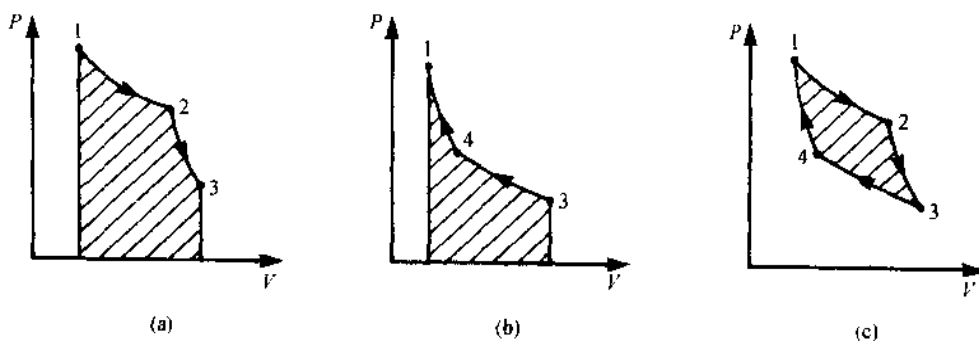


图 6-4

6.15 仔细分析图 6-3(b),用阴影表示:(a)从高温热源吸收的热量 Q_h ;(b)释放给低温热源的热量 Q_c ;(c)每个完整的卡诺循环中的净热。

解 对可逆过程 $Q = \int TdS$, 见图 6-5.

6.16 在一个完整的(卡诺)循环中,净热(图 6-5(c))与净功(图 6-4(c))之间有什么关系?

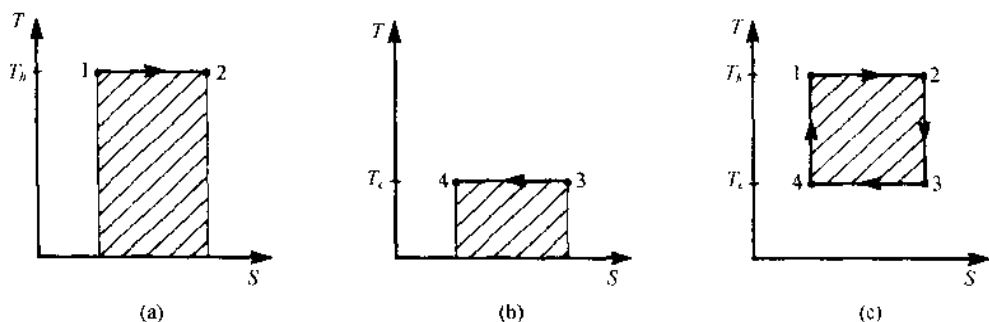


图 6-5

解 它们在数值上是相等的,看题 3.9,这个结论对任何循环都成立.

- 6.17 对一个实际热机,计算一个完整的循环中的熵变.

解 熵是一个态函数,因此 $\Delta S=0$.

- 6.18 题 6.16 中的结论是:每循环中的净热和净功在数值上相等,这个结论的含义是什么?

解 可以从循环中不同部分机械功的贡献或者从循环中的热交换这两个角度来分析热循环.

- 6.19 热效率的定义有两种:一是按照热交换定义,二是按照温度之间的关系来定义,这两种定义各适用于什么场合?

解 我们知道对任一个循环净热都等于净功,用 T - S 图只能表示可逆过程中的热传递.由热传递定义的效率对任何循环过程都适用,而按照温度定义的效率只对卡诺循环适用.

- 6.20 我们经常遇到“可逆”这个形容词,试解释它的意义.

解 根据定义,就系统从某一初态变到另一末态过程而言,如果此系统可以从此末态又回到原来的初态,同时,外界也能复原,那么这个过程就是一个可逆过程.如果这个过程中只有系统可以复原,那么这个过程称为内部可逆过程;如果这个过程中只有外界可以复原,那么这个过程称为外部可逆过程.所有的实际过程总是沿着熵增加(无序)的方向进行,所以这些过程不可逆.

- 6.21 在 T - S 图上画出卡诺循环,用阴影表示循环中的净功.

解 如图 6-5(c),根据题 6.16,阴影区的面积在数值上等于每循环中的净功.

- 6.22 有一设计者以卡诺热机作为典型对它做两种改变:(1)使高温热源的温度升高一定的数值;(2)使低温热源的温度降低相同的数值.问:(a)哪一种改变引起的效率增加大?(b)为什么在实际中几乎不采用上述结果?

解 (a)因为 $\eta^* = 1 - T_c/T_h$,

$$\frac{|\partial \eta^* / \partial T_c|}{|\partial \eta^* / \partial T_h|} = \frac{1/T_c}{T_c/T_h^2} = \frac{T_h}{T_c} > 1$$

因此降低低温热源温度引起的 η^* 增加大.

(b)在实际中,低温热源的温度等于周围环境的温度,这个温度不容易控制.

- 6.23 教员的文件夹里都有下面这样一道习题:“对理想气体的卡诺循环,证明每循环中的净功为 $R(T_h - T_c) |\ln V_1/V_2|$.”令人遗憾的是,没有一个确定的循环图.有人设想了下面两种情况:(1)过程 $1 \rightarrow 2$ 是等温膨胀过程, $T = T_h$, $2 \rightarrow 3$ 绝热膨胀,等等;(2)过程 $1 \rightarrow 2$ 是等温压缩过程, $T = T_c$, $2 \rightarrow 3$ 绝热压缩,等等.选择其中任一种假设都可以吗?

解 根据图 6-3(a),这个问题归结起来就是

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_3}{V_4} \quad \text{或} \quad \frac{V_3}{V_2} = \frac{V_4}{V_1}$$

但是根据右边的绝热方程得到 $V_3/V_2 = (T_h/T_c)^{1/(k-1)}$,根据左边的绝热方程得到 $V_4/V_1 = (T_h/T_c)^{1/(k-1)}$.因此 $V_1/V_2 = V_3/V_4$,选取哪一种假设是无关紧要的.

- 6.24 卡诺机 1 在温度为 T_h 和 T_c 的两个热源之间工作,输出的废热输入到卡诺机 2 中,卡诺

机 2 在温度为 T_i 和 T_c 的两个热源之间工作, 卡诺机 3 在温度为 T_h 和 T_c 的两个热源之间工作. 叙述卡诺机 1 和卡诺机 2 的效率与卡诺机 3 的效率的关系.

解 对卡诺机 1, $\eta^* = 1 - T_c/T_h$, 对卡诺机 2, $\eta^* = 1 - T_c/T_i$, 因此 $(1 - \eta^*)(1 - \eta^*) = (T_c/T_h)(T_c/T_i) = T_c/T_h - 1 - \eta^*$. 相乘后得到结果为 $\eta^* = \eta^* + \eta^* - \eta^* \eta^*$.

- 6.25 某热机 E 中的高温热源和低温热源具有相同的有限大小的热容量 (mc), 经历了一个微可逆循环, 高温热源的温度降低, 而低温热源的温度升高, 直到二者温度相等. 证明: (a) 最后的温度 (T_f) 是两个初始温度 T_{h0} 和 T_{c0} 的等比中项; (b) 热机输出的总功为 $mc(T_{h0} + T_{c0} - 2\sqrt{T_{h0}T_{c0}})$. (注意 (b) 从热学角度证明了等差中项比等比中项大.)

解 (a) 很少的热量 $dQ > 0$ 从高温热源流入热机, 因而 $dQ_h = -mcdT_h$, ($dT_h < 0$), 同样, 很少的热量 $dQ > 0$ 进入低温热源, $dQ_c = mcdT_c$, ($dT_c > 0$), 所以对一个微卡诺循环, $dQ_h/T_h = dQ_c/T_c$, 或 $-dT_h/T_h = dT_c/T_c$, 积分, 得

$$-\int_{T_{h0}}^{T_f} \frac{dT_h}{T_h} = \int_{T_{c0}}^{T_f} \frac{dT_c}{T_c}$$

则 $\ln(T_{h0}/T_f) = \ln(dT_f/T_{c0})$, $T_{h0}/T_f = T_f/T_{c0}$, $T_f = (T_{h0}T_{c0})^{1/2}$

(b) $dW = dQ_h - dQ_c = -mcdT_h - mcdT_c$

积分, 得

$$W = -mc \int_{T_{h0}}^{T_f} dT_h - mc \int_{T_{c0}}^{T_f} dT_c = mc(T_{h0} + T_{c0} - 2T_f) = mc(T_{h0} + T_{c0} - 2\sqrt{T_{h0}T_{c0}})$$

- 6.26 一卡诺热机在温度为 1200K 和 300K 的两个热源之间工作, 其热效率是多少?

解 $\eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - 300/1200 = 0.75$

- 6.27 一卡诺机在 500°C 和 20°C 的两个热源之间工作, 一个循环中热机的输出功为 1000kJ, 计算: (a) 热效率; (b) 一个循环中热机吸收的热量 (kJ); (c) 一个循环中热机放出的热量 (kJ); (d) 放热过程中热机的熵变 (kJ/K).

解 (a) $\eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - 293/773 = 0.621$

(b) $Q_h = W_{\text{net}}/\eta^* = 1000/0.621 = 1610\text{kJ}$

(c) $Q_c = Q_h - W_{\text{net}} = 1610 - 1000 = 610\text{kJ}$

(d) $\Delta S = -Q_c/T_c = -610/293 = -2.08\text{kJ/K}$

- 6.28 一卡诺循环在 300K 和 1200K 之间工作, 每小时吸收的热量为 20kJ, 每小时完成 6 次循环, 计算此循环的输出功率 (W).

解 $\eta^* = 1 - 300/1200 = 0.7$

因此, $\dot{W}_{\text{net}} = \eta^* \dot{Q}_h = (0.7) \left(\frac{20 \times 10^3 \text{J}}{3600\text{s}} \right) = 3.89\text{W}$

(由此可见循环速度与输出功率无关)

- 6.29 一卡诺热机在 40°F 和 1000°F 之间工作, 每循环中输出的功为 500Btu. (a) 释放给低温热源的热量是多少 (Btu/cycle)? (b) 热效率是多少?

解 (b) $\eta^* = 1 - 500/1460 = 0.65$

(a) $W_{\text{net}} = Q_h - Q_c = (W_{\text{net}}/\eta^*) - Q_c$

所以

$$Q_c = W_{\text{net}}(1 - \eta^*)/\eta^* = 500(0.342)/0.657 = 261\text{Btu/cycle}$$

- 6.30 一卡诺机, 低温热源的温度为 40°F, 循环中输出功是热机向低源热源放出热量的 2 倍, 高温热源的温度是多少 (°F)?

解 如果 $W_{\text{net}} = Q_h - Q_c = 2Q_c$, 那么 $Q_h = 3Q_c$, 且 $\frac{3Q_c}{T_h} = \frac{Q_c}{T_c}$, 则

$$T_h = 3T_c = 3(500^\circ\text{R}) = 1500^\circ\text{R} = 1040^\circ\text{F}$$

- 6.31 一理想卡诺机的效率为 2/3, 低温热源的温度为 40°F, 求高温热源的温度.

解 $\eta^* = 2/3 = 1 - 500/T_h$, 所以, $T_h = 1500^\circ\text{R} = 1040^\circ\text{F}$.

- 6.32 一卡诺热机在 0°C 和 100°C 的两个热源之间工作, 输出功率为 1kW , 每 5 分钟完成一次循环, 问每次循环中从高温热源吸收的热量是多少(kJ)?

解 设 $\eta^* = 1 - 273/373 = 0.268$, $Q_h = W_{\text{net}}/\eta^* = (1\text{kJ/s})(300\text{s})/0.268 = 1119\text{kJ}$

- 6.33 某一个动力循环中, 工作流体从温度为 500°C 的高温热源吸收的热量为 5000kJ/kg , 放给温度为 20°C 的冷却水的热量为 2000kJ/kg , 求: (a) 循环的实际热效率; (b) 在所给的两个温度之间工作的热机可能达到的最高效率.

解 (a) 对实际循环

$$\eta = 1 - Q_c/Q_h = 1 - 2000/5000 = 0.600$$

(b) 对卡诺循环

$$\eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - 293/773 = 0.621$$

- 6.34 每一个循环中, 理想的卡诺机从 700°C 的高温热源吸收的热量为 150kJ , 低温热源的温度为 25°C , 计算: (a) 低温热源的熵变; (b) 热效率.

解 (a) $Q_h/T_h = Q_c/T_c$, 则 $Q_c = Q_h(T_c/T_h) = 150(298/973) = 45.9\text{kJ}$, 这是从热机中放出而进入低温热源的热量, 所以, $\Delta S_{\text{sink}} = 45.9/298 = 0.154\text{kJ/K}$.

(b) $\eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - (25 + 273)/(700 + 273) = 69.4\%$

- 6.35 叙述卡诺定理.

解 定理 1. 在相同的高温热源和低温热源之间工作的一切不可逆热机的效率都不可能大于可逆热机的效率.

定理 2. 在相同的高温热源和低温热源之间工作的任意工作物质的可逆机, 都具有相同的效率.

- 6.36 证明卡诺定理.

解 看一下任意热机的一个完整的循环中的熵变. 对热机, $\Delta S_r = 0$ (题 6.17), 对高温热源, $\Delta S_h = -Q_h/T_h$, 对低温热源 $\Delta S_c = Q_c/T_c$, 总的熵变为

$$\Delta S_{\text{tot}} = \Delta S_r + \Delta S_h + \Delta S_c = -\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_c}{T_c} = -\frac{Q_h}{T_h} + \frac{Q_h - W_{\text{net}}}{T_c} = \frac{Q_h}{T_c} \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) - \frac{W_{\text{net}}}{T_c}$$

代入 $W_{\text{net}} = \eta Q_h$, 解得

$$\eta = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) - \frac{T_c}{Q_h} \Delta S_{\text{tot}}$$

根据热力学第二定律, $\Delta S_{\text{tot}} \geq 0$, 只有对可逆热机才能取等号, 所以可逆热机的效率 η 最大, 从而证明了定理 1. 而且, $\eta_{\text{max}} = \eta^*$ 只与两个热源的温度有关, 从而证明了定理 2.

- 6.37 有一发明者声称可以制造这样一台热机, 在 0°C 和 250°C 之间工作, 并且循环中输出功与放出的废热相等, 对于这个设计你觉得能投资吗?

解 设计的这台热机效率为 50% , 但理想效率为 $\eta^* = 1 - 273/523 = 47.8\%$, 所以不能投资.

- 6.38 有人声称可以进行下列循环: 每循环中工作物质从 500°C 的高温热源吸热 5000kJ/kg , 而放给 20°C 的冷却水的热量为 1500kJ/kg , 试分析之.

解 对提出的循环来说, $\eta = 1 - Q_c/Q_h = 1 - 1500/5000 = 70\%$, 对在 500°C 和 20°C 之间工作的卡诺循环, $\eta^* = 1 - (20 + 273)/(500 + 273) = 62.1\%$, 所以提出的这个循环是不可能存在的.

- 6.39 热机可以分为三类: 可逆的 (REV), 不可逆的 (IRREV), 不可能存在的. 根据不可能存在的热机是违反了热力学第一还是第二定律, 它们可以再分为 PMM1 和 PMM2. 将图 6-6 中的热机分类.

解 每一种情况, $\eta^* = 0.7$. (a) 能量守恒, $\eta = 0.7 = \eta^*$; REV. (b) 能量守恒, $\eta = 0.8 > \eta^*$; PMM2. (c) 能量不守恒; PMM1. (d) 能量守恒, $\eta = 0.6 < \eta^*$; IRREV.

- 6.40 如果放出的热量增加一倍, 重解题 6.38.

解 现在 $\eta = 1 - Q_c/Q_h = 1 - 3000/5000 = 40\% < \eta^*$, 所以提出的循环是可能存在的. (一个人能否制造出这样一个实际循环, 它的效率达到同温度下的卡诺效率的 $2/3$, 这是相当可疑的.)

- 6.41 求出题 6.25 中热机的效率, 并证明它小于在温度为 T_{h0} 和 T_{c0} 之间工作的卡诺循环效率.

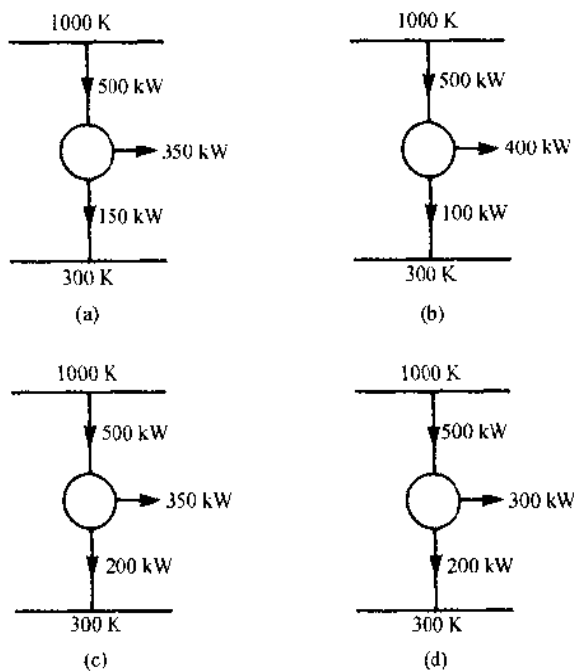


图 6-6

解 由题 6.25(b),

$$Q_h = mc(T_{h0} - T_f) = mc \sqrt{T_{h0}} (\sqrt{T_{h0}} - \sqrt{T_{c0}})$$

$$Q_c = mc(T_f - T_{c0}) = mc \sqrt{T_{c0}} (\sqrt{T_{h0}} - \sqrt{T_{c0}})$$

因而

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \sqrt{\frac{T_{c0}}{T_{h0}}}$$

对 $0 < x < 1, \sqrt{x} > x$, 所以

$$\eta < 1 - (T_{c0}/T_{h0}) = \eta^*$$

6.42 图 6-6(d)中不可逆机产生的熵变率是多少?

解 $\dot{S}_{\text{ex}} = -\frac{\dot{Q}_h}{T_h} + \frac{\dot{Q}_c}{T_c} = -\frac{500 \text{ kW}}{1000 \text{ K}} + \frac{200 \text{ kW}}{300 \text{ K}} = \frac{1}{6} \text{ kW/K}$

6.43 一卡诺机的热效率为 40%, 此热机的高温热源温度为 727°C, 求低温热源的溫度.

解 $\eta^* = 1 - T_c/T_h$, 因而 $T_c = (1 - \eta)T_h = (0.60)(1000 \text{ K}) = 600 \text{ K} = 327^\circ\text{C}$.

空气卡诺循环

6.44 1 kg 理想空气 ($R = 0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$) 卡诺循环过程如图 6-7, 它的热效率为 $(1000 - 150)/1000 = 85\%$, 计算点 3 的压强 (bar). 你的结果有没有让人对这个循环的兴趣有所

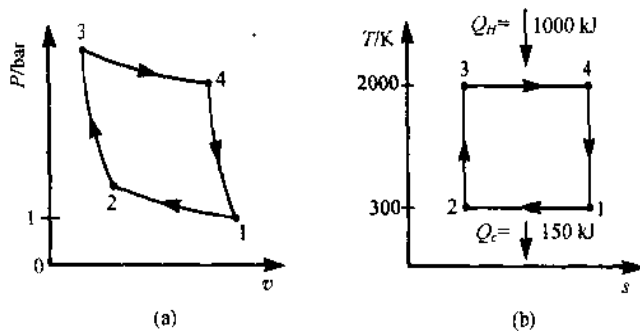


图 6-7

减弱?

解 对等温过程 $1 \rightarrow 2$, $-q_c + W = 0$, 根据题 3.19(a), $W = -RT \ln(v_2/v_1) = RT \ln(P_2/P_1)$, 因此 $P_2 = \exp(q_c/RT) = \exp[150/(0.287)(300)] = 5.71 \text{ bar}$, 过程 $2 \rightarrow 3$ 绝热, 因而 $P_3/P_2 = (T_3/T_2)^{k/(k-1)}$, 除了 P_3 未知外, 其他量都是已知量, 可以求出 $P_3 = 4369 \text{ bar}$. 点 3 的压强非常高, 所以这个循环难以实现.

- 6.45 一标准空气(理想空气)卡诺循环中, 最低的压强和温度分别为 1 bar , 330 K , 每 kg 空气吸收的热量为 1250 kJ , 达到的最高温度为 2500 K , 求: (a) 循环效率; (b) 平均有效压强.

解 (a) $\eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - 330/2500 = 86.8\%$

(b) 根据图 6-7, 平均有效压强的定义为净功除以最大的体积变化量, 即 $\text{mep} = \eta^* q_h / (v_1 - v_2)$, 分子已知, 下面计算分母. 点 1, $v_1 = R_c T_c / (MP_1) = (0.08314)(300)/(28.97)(1) = 0.9471 \text{ m}^3/\text{kg}$, $1 \rightarrow 2$ 等温过程, $q_c = w = -RT_c \ln(v_2/v_1)$, 则(由 $q_h/T_h = q_c/T_c$ 得到) $q_h = -RT_h \ln(v_2/v_1)$, 由此得 $v_2 = 0.1659 \text{ m}^3/\text{kg}$. v_3 可由绝热关系 $T_h/T_c = (v_2/v_3)^{k-1}$ 得出, $v_3 = 0.00105 \text{ m}^3$, 所以,

$$\text{mep} = \frac{(0.868)(1250 \text{ kJ/kg})}{(0.9471 - 0.00105) \text{ m}^3/\text{kg}} = 1147 \text{ kJ/m}^3 = 1147 \text{ kPa}$$

- 6.46 完成下列关于理想空气卡诺循环的说明表.

状态	P/bar	$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	T/K	状态	P/bar	$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	T/K
1	1	2	350	3	—	—	1400
2	5	0.2	350	4	—	—	1400

解 根据图 6-7, 对理想气体的绝热过程, P 与 T 的关系为 $P_3/P_2 = (T_h/T_c)^{k/(k-1)} = P_1/P_1$, 则 $P_3/P_4 = 5$, $2 \rightarrow 3$ 过程, $\Delta s = c_p \ln T_h/T_c - R \ln P_3/P_2 = 0$, 这里 $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 解得 $P_3 = 640 \text{ bar}$, 因而 $P_1 = P_3/5 = 128 \text{ bar}$. P_3 和 P_4 已知, 由理想气体定律可以求出 $v_3 = 0.00628 \text{ m}^3/\text{kg}$, $v_4 = 0.03140 \text{ m}^3/\text{kg}$.

- 6.47 题 6.46 中, 每循环中每千克空气: (a) 从高温热源吸收的热量是多少? (b) 释放给低温热源的热量是多少?

解 (a) 等温过程 $3 \rightarrow 4$ 中, $q_h = -w_{34} = RT_h \ln(P_3/P_4) = (0.287)(1400) \ln 5 = 647 \text{ kJ/kg}$.

(b) 由卡诺公式得, $q_c = (T_c/T_h)q_h = (1/4)(647) = 161.7 \text{ kJ/kg}$.

- 6.48 一卡诺机中的热流体是一磅空气, 此热机在 1000°R 和 500°R 的两个热源之间工作, 经等温吸热后, 压强减少到初始压强的 48.2%, 计算: (a) 循环热效率; (b) 循环中的净功.

解 (a) $\eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - 500/1000 = 50\%$

(b) 根据图 6-7, $q_h = -w_{34} = RT_h \ln(P_3/P_4) = (0.06856 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ \text{R})(1000^\circ \text{R}) \ln 1/0.482 = 50 \text{ Btu/lb}_m$, $w_{\text{net}} = \eta^* q_h = 25 \text{ Btu/lb}_m$.

- 6.49 一卡诺热机释放 40 Btu 热量给 40°F 的低温热源, 同时产生的净功为 100 Btu , 计算高温热源的温.

解 吸收的总能量必须等于放出的总能量: $Q_h = W_{\text{net}} + Q_c = 100 + 40 = 140 \text{ Btu}$. 对卡诺机, $Q_h/T_h = Q_c/T_c$, 则 $T_h = T_c(Q_h/Q_c) = 500(140/40) = 1750^\circ \text{R} = 1290^\circ \text{F}$.

卡诺热泵

- 6.50 一卡诺热泵的性能系数(热泵的性能系数也叫供热系数)为 10, 吸收热量的高温区温度保持 25°C , 问放热的低温区温度是多少?

解 反向运行的卡诺热泵是一种卡诺热机, 效率 $\eta^* = 1/10.0 = 0.1$ 因而 $0.1 = 1 - T_c/298$, 得 $T_c = 268 \text{ K} = -5^\circ \text{C}$.

- 6.51 一卡诺热泵从低温热源吸热 100 Btu , 放出热量 1000 Btu 给高温热源, 求它的性能系数(COP).

解 对此热泵, $\eta^* = 1 - (600/1000) = 0.4$, 所以 $\text{COP} = 1/0.4 = 2.5$.

- 6.52 求在 30°F 和 100°F 的两个热源之间工作的卡诺热泵的 COP。

解 $\eta' = 1 - (490/560) = 1/8 \quad \text{COP} = 1/\eta' = 8$

卡诺致冷机

- 6.53 有人声称制造了下述一套致冷设备,可以使 80°F 的房间吸收 20°F 的低温空间的热能并保持低温区的温度不变,他还声称这套设备的性能系数(致冷机的性能系数即为致冷系数)是 8.5。(a)你觉得可信吗?(b)如果这套设备的性能系数为 8.0,你觉得如何?

解 (a) $T_c = 460 - 20 = 480^\circ\text{R}$, $T_h = 460 + 80 = 540^\circ\text{R}$ 。任何致冷机, $\text{COP} = Q_c/W_{\text{net}}$, 而卡诺机, $\text{COP} = T_c/(T_h - T_c) = 480/(540 - 480) = 8.0$ 。因此这套设备不可能制成。

(b) $\text{COP} = \text{COP}^* = 8.0$, 所以在理论上这套设备是可行的,但实际致冷机是不可逆的,所以仍然不可能实现。

- 6.54 一卡诺致冷机在 0°C 和 30°C 之间工作,外界输入功率与致冷量(kW)的比值是多少?

解 $W_{\text{net}}/Q_c = (Q_h/Q_c) - 1 = (T_h - T_c) - 1 = (303/273) - 1 = 0.11$

- 6.55 一卡诺致冷机从低温热源吸热 600 Btu,向高温热源放热 1000 Btu,求它的性能系数。

解 $(\text{COP})_{\text{ref}} = Q_c/(Q_h - Q_c) = 600/(1000 - 600) = 1.50$

- 6.56 在相同温限之间工作的热泵和致冷机的性能系数有什么关系?

解 $(\text{COP})_{\text{pump}} = Q_h/(Q_h - Q_c)$; $(\text{COP})_{\text{ref}} = Q_c/(Q_h - Q_c)$, 因此, $(\text{COP})_{\text{pump}} = (\text{COP})_{\text{ref}} + 1$ 。

- 6.57 一卡诺致冷机,低温热源的温度为 -10°C,制冷量为 6 kW,外界输入功率为 1 kW,求:(a)它的性能系数;(b)高温热源的温度。

解 (a) $\text{COP} = \dot{Q}_c/\dot{W}_{\text{net}} = 6$

(b) $T_h = T_c(Q_h/Q_c) = T_c(1/(\text{COP} + 1)) = (263)(7/6) = 307\text{K}$

- 6.58 一卡诺致冷机在 10°F 和 80°F 之间工作,求它的性能系数。

解 $(\text{COP})_{\text{ref}} = Q_c/W = T_c/(T_h - T_c) = (460 + 10)/(80 - 10) = 6.71$

- 6.59 一卡诺致冷机,每循环中放出给 540°R 的高温热源的热量为 500 Btu,从低温热源吸热 390 Btu,计算:(a)COP;(b) T_c 。

解 (a) $(\text{COP})_{\text{ref}} = Q_c/(Q_h - Q_c) = 390/(500 - 390) = 3.55$

(b) $T_c = T_h(Q_c/Q_h) = 540(390/500) = 421^\circ\text{R}$

- 6.60 一卡诺致冷机从 20°F 的低温热源吸热 500 Btu,放热 700 Btu 给高温热源,求:(a)此设备的性能系数;(b)高温热源的温度。

解 (a) $(\text{COP})_{\text{ref}} = Q_c/(Q_h - Q_c) = 500/(700 - 500) = 2.50$

(b) $T_h = T_c(Q_h/Q_c) = 480(700/500) = 672^\circ\text{R} = 212^\circ\text{F}$

- 6.61 一卡诺致冷机的性能系数为 3.5,高温热源的温度为 80°F,低温热源的温度为多少?

解 $(\text{COP})_{\text{ref}} = T_c/(T_h - T_c)$, 即 $3.5 = T_c/(540 - T_c)$, 则 $T_c = 420^\circ\text{R} = -40^\circ\text{F}$ 。

- 6.62 一卡诺致冷机在 -20°C 和 20°C 之间工作,计算 COP*。

解 $\text{COP}^* = T_c/(T_h - T_c) = 253/[20 - (-20)] = 6.33$

- 6.63 现在想通过改变题 6.62 中的两个温度,使性能系数刚好等于 7.0,如果高温热源温度升高的数值等于低温热源温度降低的数值,那么改变后的温度是多少?

解 假设改变量为 x , 则 $\text{COP}^* = T_c/(T_h - T_c) = (253 - x)/[(293 + x) - (253 - x)] = 7.0$, 解得 $x = -1.8^\circ$ 。因此, $T_c = 253 - (-1.8) = 254.8\text{K}$, $T_h = 293 - 1.8 = 291.2\text{K}$ 。

氟里昂卡诺致冷机

- 6.64^D 以氟里昂(R12)为工质的卡诺致冷机,运行在饱和态(10 bar)和二相态(1 bar)之间。
(a)在 T - s 图上画出此循环;(b)计算等熵压缩功(kJ/kg R12);(c)计算性能系数。

解 (a) 见图 6-8.

(b) 此致冷机是一个可逆的稳定流动的装置, 遵循 $T\Delta s + w = \Delta h$. 等熵压缩, $\Delta s = 0$, 则 $w_{12} = h_2 - h_1$ 根据表 C4, $s_2 = (10\text{bar 时的 } s_g) = 4.514\text{kJ/kg} \cdot \text{K} = s_1$, 因而 $4.514 = (1 - x_1)(3.893) + x_1(4.576)$, 则 $x_1 = 0.953$, $h_1 = (1 - x_1)h_f + x_1h_g = (1 - 0.953)(372.1) + (0.953)(538.2) = 530.4\text{kJ/kg}$. 同理, $h_2 = (10\text{bar 时的 } h_g) = 569.0\text{kJ/kg}$, $w_{12} = 569.0 - 530.4 = 38.6\text{kJ/kg}$.

(c) 根据表 C4, $\text{COP}^* = T_c / (T_h - T_c) = 243 / (315 - 243) = 3.38$.

6.65^D 通过计算 q_c 和 w_{net} 证明题 6.64(c) 的结果.

解 问题 6.64(b), 根据表 C4, $s_3 = 4.137\text{kJ/kg} \cdot \text{K} = s_4$ 由此得 $x_4 = 0.357$, $h_4 = 431.4\text{kJ/kg}$. 因而 $q_c = h_1 - h_4 = 530.4 - 431.4 = 99.0\text{kJ/kg}$. 结合循环中的能量方程, 求得

$$w_{\text{net}} = -\oint Tds = \text{矩形面积} = (T_h - T_c)(s_2 - s_3) \\ = [(315 - 243)\text{K}][4.514 - 4.137]\text{kJ/kg} \cdot \text{K} = 29.3\text{kJ/kg}$$

因而

$$\text{COP} = q_c / w_{\text{net}} = 99.0 / 29.3 = 3.38$$

6.66^D 一卡诺制冷机以 R12 为工质, R12 在冷凝器中等压地从饱和蒸汽变为饱和液体, 其压强为 150psia, R12 在蒸发器中的压强为 15psia. (a) 在 $T-s$ 图上画出这个循环; (b) 等熵压缩功是多少 (Btu/lb_m R12)? (c) 性能系数是多少?

解 (a) 在图 6-8 中标出等压线.

(b) 这个致冷机是一个可逆的稳定流动的设备, 遵循 $T\Delta s + w = \Delta h$. 等熵压缩, $\Delta s = 0$, $w_{12} = h_2 - h_1$. 根据表 C3, $s_2 = (150\text{bar 时的 } s_g) = 0.1628\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s_1$, 则 $0.1628 = (1 - x_1)(0.0094) + x_1(0.1711)$, $x_1 = 0.9487$. 因此,

$$h_1 = (1 - 0.9487)(4.08) + (0.9487)(75.03) = 71.38\text{Btu/lb}_m$$

同样, $h_2 = (150\text{psia 的 } h_g) = 87.80\text{Btu/lb}_m$, $w_{12} = 87.80 - 71.38 = 16.42\text{Btu/lb}_m$.

(c) 根据表 C3,

$$\text{COP}^* = \frac{T_c}{T_h - T_c} = \frac{-20.8 + 459.7}{109.5 - (-20.8)} = 3.37$$

6.67^D 通过计算 q_c 和 w_{net} 证明题 6.66(c) 的结果.

解 问题 6.66(b) 根据表 C3, $s_3 = 0.0672\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s_4$, 由此得 $x_4 = 0.3574$, $h_4 = 29.44\text{Btu/lb}_m$. 因此, $q_c = h_1 - h_4 = 71.38 - 29.44 = 41.94\text{Btu/lb}_m$. 结合循环中的能量方程可以求出 w_{net} .

$$w_{\text{net}} = -\oint Tds = \text{矩形的面积} = (T_h - T_c)(s_2 - s_3) \\ = (130.3^\circ\text{R})(0.0956\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) = 12.46\text{Btu/lb}_m$$

因而 $\text{COP} = q_c / w_{\text{net}} = 41.94 / 12.46 = 3.37$.

6.68^D 题 6.64 中, 如果冷凝过程的初始状态仍是 10bar 的饱和蒸汽, 但终了状态是干度为 50% 的湿饱和蒸汽, 那么 COP^* 是多少?

解 新的卡诺循环如图 6-9, 工作温限与题 6.64 中相同, 因此 COP^* 不变.

6.69^D 关于题 6.66, 以 R12 为工质的致冷机, 冷凝器入口处状态为饱和蒸汽, 冷凝器内压强为 150psia, 蒸发器内压强为 15psia, 每循环中的净功为 4000ft · lb_f/lb_m R12, 计算致冷能力 (Btu/lb_m R12).

解 与热量同单位, $w_{\text{net}} = 4000 / 778.16 = 5.14\text{Btu/lb}_m\text{R12}$. 因为这个循环与题 6.66 中循环的温限相同 (虽然冷凝过程不一样), 所以 $\text{COP}^* = 3.37$, 则 $q_c = \text{COP}^* \times w_{\text{net}} = 3.37(5.14) = 17.32\text{Btu/lb}_m\text{R12}$.

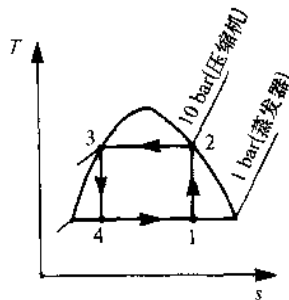


图 6-8

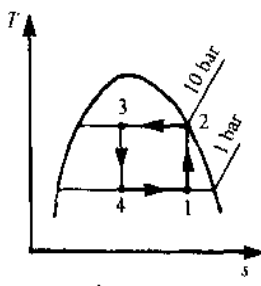


图 6-9

氟里昂卡诺热泵

- 6.70^P 现在需要设计一个以 R12 为工作物质的卡诺热泵, 冷凝过程保持压强为 10 bar 不变, 冷凝器进口处为干饱和蒸汽, 出口处为饱和液体, 每循环中, 压缩机消耗的功为 25 kJ, 放出的热量为 100 kJ。(a) 压缩机消耗多少功(kJ/kg R12)? (b) 循环的性能系数是多少? (c) 在 $T-s$ 图上画出这个循环。

解 (a) 热泵放出的热量是指在冷凝器中释放到周围环境中的热量, $Q_h = -100 \text{ kJ}$, 温度 $T_h = 314.9 \text{ K}$ 和压强为 10 bar 是饱和蒸汽的状态参量, 在这个压强下 R12 从饱和蒸汽变为饱和液体, $q_h = h_{fg} = h_f - h_g = 440.8 - 569.0 = -128.2 \text{ kJ/kg R12}$ 的质量为 $m = Q_h / q_h = 100 / 128.2 = 0.780 \text{ kg}$, 每 0.780 kg R12 需要的压缩功为 25 kJ, 则 $25 / 0.78 = 32.1 \text{ kJ/kg R12}$ 。

(b) 我们必须求出 T_c , 因为流体离开压缩机进入冷凝器时的焓为 569.0 kJ/kg, 压缩前的焓必为 $569.0 - 32.1 = 536.9 \text{ kJ/kg}$ 。同样, 对等熵压缩(图 6-10 中 1→2), 熵为 4.544 kJ/kg·K。根据莫雷($h-s$)表我们很容易求出 T_c , 但是我们必须利用这些表进行多次试验。

第一种猜想: 压缩机入口压强为 1 bar, 焓必为 536.9, 这就意味着必须满足 $536.9 = (1 - x_1)(372.1) + x_1(538.2)$, 则 $x_1 = 0.9922$, 由此得 $s_1 = s_2 = (1 - 0.9922)(3.893) + (0.9922)(4.576) = 4.570 \text{ kJ/kg·K}$ 。这个值比需要的值 4.544 大。

第二种猜想: 压缩机入口处的压强为 2.5 bar, 由方程 $536.9 = (1 - x_2)(394.0) + x_2(549.2)$ 得 $x_2 = 0.9207$, 这里 $s = s_2 = (1 - 0.9207)(3.978) + (0.9207)(4.550) = 4.513$ 。这个值太小了。

假设压缩机入口压强为 1.5 bar, $x_3 = 155.7 / 161.7 = 0.9629$, 这里 $s_1 = s_2 = 0.146 + 4.398 = 4.544$ 。这个正是我们需要的值, 因此温度为 253.0 K, $\text{COP}^* = 314.9 / (314.9 - 253.0) = 5.09$ 。

(c) 看图 6-10。

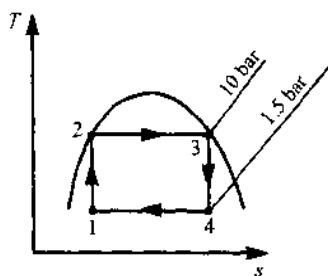


图 6-10

- 6.71^P 现在需要设计一个以 R12 为工质的卡诺热泵, 蒸发器压强为 15 psia, 压缩机每消耗 16.06 Btu 功, 产生的致冷能力为 50 Btu。求: (a) 冷凝器压强(psia); (b) 每循环的净功(Btu); (c) 循环的性能系数, 假设在冷凝器中 R12 从饱和蒸汽变为饱和液态。

解 (a) 蒸发器的温度是与 15 psia 对应的饱和温度, $T_c = -20.8^\circ \text{F} = 438.9^\circ \text{R}$, 这个温度下致冷能力为 50 Btu, 引起的熵变等于 $\Delta s = Q / T = 50 / 438.9 = 0.1139 \text{ Btu/}^\circ \text{R}$ 。这个结果在数值上等于冷凝过程中的熵变。由表给出的 h_f 和 h_g 的单位为 Btu/lb_m, 需求出致冷剂的质量(lb_m)。过程如下: 假设冷凝器的压强(或温度)等于某一数值, 根据表可以求出冷凝过程的熵变, 比较 $\Delta s = 0.1139 \text{ Btu/}^\circ \text{R}$ 与由表得出的 Δs , 可以求出质量, 单位为 lb_m。接下来计算等熵过程的压缩功, 并与希望的数值 16.06 Btu 比较。

假设冷凝器压强为 150 psia,

$$\Delta s = s_g - s_f = 0.1628 - 0.0672 = 0.0956 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$$

因此 $m = 0.1139 / 0.0956 = 1.1914 \text{ lb}_m$ 。这里 s_g 的数值也是在蒸发器中的熵值 s , 因而 $0.1628 = (1 - x_1)(0.0094) + x_1(0.1711)$, 由此得 $x_1 = 0.9487$, 入口处焓为 $(1 - 0.9487) \times (4.08) + (0.9487)(75.03) = 71.39 \text{ Btu/lb}_m$ 。等熵压缩过程的焓变为 $87.80 - 71.39 = 16.41 \text{ Btu/lb}_m$ 。总的变化 $(1.1914 \text{ lb}_m)(16.41 \text{ Btu/lb}_m)$, 很显然, 这个值比期望值 16.06 Btu 大。假设的冷凝器压强必须减小。

再假设冷凝器压强为 100 psia, $\Delta s = 0.1639 - 0.055 = 0.1084 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$, 因而 $m = 0.1139 / 0.1084 = 1.0507 \text{ lb}_m$, 由 $s_g = 0.1639 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ \text{R}$, 得 $x_1 = 0.1545 / 0.1617 = 0.9555$, 入口处的焓等于 $0.181 + 71.691 = 71.87 \text{ Btu/lb}_m$, 这一特定等熵过程的焓变为 $85.35 - 71.87 = 13.48 \text{ Btu/lb}_m$, 最后结果为 14.16 Btu , 这个值太小。

因为表中没有 100 到 150 psia 之间的饱和压强, 所以必须利用线性插入法, 150 psia 时, 压缩机做功为 19.55 Btu, 100 psia, 压缩机做功为 14.16 Btu, 所以在 $100 + [(16.06 - 14.16) / (19.55 - 14.16)](50) = 117.6 \text{ psia}$ 时做功 16.06 Btu。线性内插可以求出这个压强下的饱和温度 $T_h = 90.9^\circ \text{F} = 550.6^\circ \text{R}$ 。

(b) 循环效率 $\eta^* = 1 - T_c / T_h = 1 - 438.9 / 550.6 = 0.2029$, 因而

$$W_{\text{net}} = \eta^* Q_c / (1 - \eta^*) = (0.2029)(50) / 0.7971 = 12.73 \text{ Btu}$$

$$(c) \quad \text{COP}^* = T_h / (T_h - T_c) = 550.6 / (550.6 - 438.9) = 4.93$$

氟里昂卡诺热机

6.72^D 一卡诺热机的工质为 R12, 饱和液态 R12 从 300K 的高温热源吸热(kJ/kgR12)变为饱和蒸汽, 冷凝器的温度为 250K, 计算: (a) 循环热效率(%); (b) 每循环中吸收的热量(kJ/kgR12); (c) 每循环中放出的热量(kJ/kgR12); (d) 每循环中的膨胀功(kJ/kgR12); (e) 每循环中的净功(kJ/kgR12).

解 (a) $\eta^* = (T_h - T_c) / T_h = (300 - 250) / 300 = 16.7\%$

(b) 根据图 6-10 中的数字标号及能量守恒, 得 $q_h = h_3 - h_2 = 563.5 - 426.0 = 137.5 \text{ kJ/kg}$.

(c) $q_c = h_1 - h_4$, $s_2 = s_1 = 300\text{K}$ 时的 $s_f = 4.090 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = (1 - x_1)(3.918) + x_1(4.570)$, 则 $x_1 = 0.2638$, 所以点 1 的焓 $h_1 = (1 - 0.2638)(378.5) + (0.2638)(541.5) = 421.5 \text{ kJ/kg}$. 同理, $s_4 = s_3 = 300\text{K}$ 时的 $s_g = 4.548 = (1 - x_4)(3.918) + x_4(4.570)$, 则 $x_4 = 0.9663$, 所以 $h_4 = (1 - 0.9663)(378.5) + (0.9663)(541.5) = 536.0 \text{ kJ/kg}$. 最后求得 $q_c = 421.5 - 536.0 = -114.5 \text{ kJ/kg}$ (负号表示放出).

(d) $w_{\text{exp}} = h_4 - h_3 = 536.0 - 563.5 = -27.5 \text{ kJ/kg}$ (负号表示输出).

(e) $w_{\text{net}} = w_{\text{exp}} + w_{\text{comp}} = (h_4 - h_3) + (h_2 - h_1) = -27.5 + (426.0 - 421.5) = -23.0 \text{ kJ/kg}$ (负号表示输出).

6.73 利用适当的公式检验题 6.72 的结果

解 由热机的常用标记, 题 6.72 的结果(单位为 kJ/kg)如下:

$$q_h = 137.5, \quad q_c = 114.5, \quad w_{\text{net}} = 23.0$$

某系统经历一个完整的循环,

$$w_{\text{net}} = q_{\text{net}} = q_h - q_c \quad \text{即} \quad 23.0 = 137.5 - 114.5$$

$$\eta = w_{\text{net}} / q_h = 23.0 / 137.5 = 0.1673$$

这和题 6.72(a)一致. 最后, $q_{\text{net}} = T-s$ 图中矩形的面积, 现在 $\Delta T = T_h - T_c = 300 - 250 = 50\text{K}$

$$\Delta s = s_3 - s_2 = [s_g - s_f(300\text{K})] = 4.548 - 4.090 = 0.458 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

因此, $(\Delta T)(\Delta s) = (50)(0.458) = 22.9 \text{ kJ/kg}$.

这和上面得到的值 23.0 kJ/kg 一致.

6.74^D 以 R12 为工质的某卡诺机循环中, 80°F 的饱和液态 R12 从外界吸热变成同温度的饱和气, 如果冷凝器的温度为 -10°F, 计算: (a) 每循环中吸收的热量(Btu/lb_m); (b) 每循环中放出的热量(Btu/lb_m); (c) 每循环中的膨胀功(Btu/lb_m); (d) 循环的热效率.

解 (a) $q_h = h_3 - h_2 = 85.28 - 26.37 = 58.91 \text{ Btu/lb}_m$

(b) $q_c = h_1 - h_4$, 根据等式 $s_1 = s_2$ 及 $s_3 = s_4$ 可以求出点 1 和点 4 的焓, 对点 1,

$$s_1 = s_2 = (80^\circ\text{F 的 } s_f) = 0.0548 = (1 - x_1)(0.0146) + x_1(0.1699)$$

则 $x_1 = 0.2589$. 因而 $h_1 = (1 - 0.2589)(6.37) + (0.2589)(76.20) = 24.45 \text{ Btu/lb}_m$.

同理, 点 4, $s_4 = s_3 = 0.1639 = (1 - x_4)(0.0146) + x_4(0.1699)$

则 $x_4 = 0.9614$, $h_4 = (1 - 0.9614)(6.37) + (0.9614)(76.20) = 73.51 \text{ Btu/lb}_m$ 因此 $q_c = 24.45 - 73.51 = -49.06 \text{ Btu/lb}_m$ (负号表示放出).

(c) $w_{\text{exp}} = h_4 - h_3 = 73.51 - 85.28 = -11.77 \text{ Btu/lb}_m$ (负号表示输出).

(d) $\eta = 1 - (q_c / q_h) = 1 - (49.06 / 58.91) = 0.1672$

6.75^D 利用适当的热力学关系证明题 6.74 的结果.

解 题 6.74 的结果(单位为 Btu/lb_m)是: $q_h = 58.91$, $q_c = 49.06$, $w_{\text{exp}} = 11.77$. 通过各自的焓变可以检验两个热量, $q_h = T_h(s_3 - s_2) = (539.7)(0.1639 - 0.0548) = 58.88$ (足够的接近). $q_c = T_c(s_4 - s_1) = (449.7)(0.1639 - 0.0548) = 49.06$ (完全一致). 检验效率, $\eta^* = 1 - (T_c / T_h) = 1 - (449.7 / 539.7) = 0.1668 = 16.7\%$. 这个值与上面的结果一致. 最后, 压缩混合态从 1→2 需要的功

$$w_{\text{comp}} = h_2 - h_1 = 26.37 - 24.45 = 1.92 \text{ Btu/lb}_m$$

检验:

$$w_{\text{exp}} - w_{\text{comp}} = q_h - q_c$$

$$11.77 - 1.92 = 58.91 - 49.06$$

$$9.85 = 9.85$$

水卡诺致冷机

- 6.76 某卡诺致冷机循环的工质是蒸汽或水,蒸发器温度为 300K,冷凝器温度为 500K,在冷凝过程中水蒸气从饱和蒸汽变为饱和液态水,计算:(a)压缩机需做的功(kJ/kg);(b)每循环中的净功;(c)性能系数.

解 (a)根据图 6-8 中的标号,有 $s_2 = (500\text{K 的 } s_g) = 6.233\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$,因而,在点 1, $s_1 = s_2 = 6.233 = (1-x_1)(0.393) + x_1(8.520)$,则 $x_1 = 0.7186$, $h_1 = (1-0.7186)(112.5) + (0.7186)(2550) = 1864\text{kJ}$. 压缩机做的功 $w_c = h_2 - h_1 = 2801 - 1864 = 937\text{kJ/kg}$.

(b) $w_{\text{net}} = \eta^* q_h$, $q_h = h_2 - h_3 = (500\text{K 时的 } h_{fg}) = 1825\text{kJ/kg}$, $\eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - 300/500 = 0.4$
因而 $w_{\text{net}} = (1825)(0.4) = 730\text{kJ/kg}$.

(c) $\text{COP}^* = T_c/(T_h - T_c) = 300/(500 - 300) = 1.5$

- 6.77 以水为工质的某卡诺致冷机循环中,蒸发器的压强为 10psia,冷凝器压强为 500psia,在冷凝过程中饱和水蒸气变为刚好饱和的液态水,计算:(a)压缩功(Btu/lb_m);(b)致冷能力(Btu/lb_m);(c)性能系数.

解 (a)在图 6-8 中的压缩过程 1→2 中, $w_{\text{comp}} = h_2 - h_1$; 现在 $h_2 = (500\text{psia 时的 } h_g) = 1205\text{Btu/lb}_m$, 在这一点, 焓为 $1.464\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 因此, 在 10psia 时, $s_1 = s_2 = 1.464 = (1-x_1)(0.284) + x_1(1.788)$, 则 $x_1 = 0.7846$, 因此, $h_1 = (1-0.7846)(161.3) + (0.7846)(1143) = 932\text{ Btu/lb}_m$, $w_{\text{comp}} = 1205 - 932 = 273\text{Btu/lb}_m$.

(b) $q_c = T_c(s_1 - s_4)$, 这里 $T_c = 193.2 + 459.7 = 652.9^\circ\text{R}$, $s_1 - s_4 = s_2 - s_3 = (500\text{psia 时的 } s_{fg}) = 1.464 - 0.649 = 0.815\text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 因此 $q_c = 652.9(0.815) = 532.1\text{ Btu/lb}_m$.

(c) $\text{COP}^* = T_c/(T_h - T_c) = 652.9/(467.0 - 193.2) = 2.38$

- 6.78 某卡诺致冷循环的工质是水,在冷凝过程中饱和水蒸气变为刚好饱和的液态水,蒸发器的温度是 300K,假设致冷能力刚好为 1000kJ/kg,那么冷凝器的温度(K)或压强(bar)必须等于多少?

解 因为此设备是卡诺机, $q_c/T_c = q_h/T_h$, 因而 $1000/300 = 3.333 = q_h/T_h = \Delta s_h$. 在 500K 时, $s_g - s_f = \Delta s_h = 6.233 - 2.581 = 3.652\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, 这个值太大, 因为 $T \rightarrow T_c$ 时 $s_g - s_f \rightarrow 0$, 初始值太大, 我们以高些的温度或压强再试试. 在 50bar(537.1K), $s_g - s_f = 5.974 - 2.921 = 3.053\text{kJ/kg}$, 这个值太小. 在 40bar(523.5K)时值为 3.272, 小了一点. 在 30bar(506.8K)时值为 3.539——太大. 因此, 根据内插法, $P = 30 + [(3.333 - 3.539)/(3.272 - 3.539)](40 - 30) = 37.7\text{bar}$. 这和饱和温度 520K 相对应, 这时 $s_g - s_f = 6.093 - 2.765 = 3.328\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, 这和需要的值 3.333kJ/kg·K 很接近.

水卡诺热泵

- 6.79 某卡诺热泵的工质是水,在放热过程中刚好饱和的水蒸气变为刚好饱和的液态水,蒸发器温度为 300K. (a)如果致冷能力为 1000kJ/kg,那此设备放出的热量(kJ/kg)是多少? (b)性能系数是多少?

解 (a)这个设备和题 6.78 中作为热泵的设备是完全一样的, 如果没有意识到这一点, 那么可以按题 6.78 的步骤去求冷凝器的温度(520K). 由这个结果, 又因为此设备是卡诺机, 得

$$q_h = q_c (T_h/T_c) = 1000(520/300) = 1733\text{kJ/kg}$$

(b) $\text{COP}^* = T_h/(T_h - T_c) = 520/(520 - 300) = 2.36$.

- 6.80 某卡诺热泵的工质是水,蒸发器压强为 10psia,冷凝器压强为 500psia. 在冷凝过程中饱和水蒸气变为饱和液态水,致冷能力为 200Btu,计算:(a)需要的水蒸气质量;(b)设备的性能系数.

解 (a) 在 500psia 时, 蒸汽的焓为 $1205 - 450 = 755 \text{ Btu/lb}_m$, 温度为 $467.0 + 459.7 = 926.7^\circ\text{R}$. 在 10psia 时, 饱和温度为 $193.2 + 459.7 = 652.9^\circ\text{R}$, 因此,

$$q_c = q_h (T_c/T_h) = (755)(652.9/926.7) = 531.9 \text{ Btu/lb}_m$$

这是 1 lb_m 的水蒸汽的致冷能力, 200Btu 的致冷能力需要的水蒸气质量为 $200/531.9 = 0.376 \text{ lb}_m$.

(b)
$$\text{COP} = T_h / (T_h - T_c) = 926.7 / (926.7 - 652.9) = 3.38$$

水卡诺热机

- 6.81 现在使一个活塞-汽缸装置中的水蒸气经历一个卡诺循环, 等温膨胀之前水蒸气的状态是干度为 50% 的湿饱和蒸汽, 压强是 30bar, 等温膨胀之后此流体为饱和蒸汽, 当水的压强为 0.2bar 时放出热量, 利用 T-s 图计算: (a) 高温热源和低温热源的温度 (K); (b) 循环的热效率; (c) 每循环中吸收的热量.

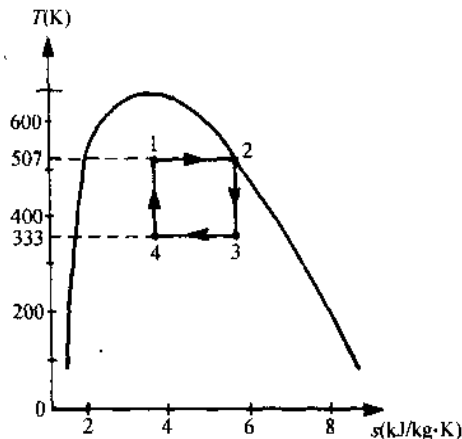


图 6-11

解 (a) 根据图 6-11, 点 1 表示等温膨胀之前干度为 50% 的湿饱和蒸汽, 点 2 表示等温膨胀后的饱和蒸汽, 压强为 30bar 由表 A4 查得, 1→2 过程,

对应的温度为 506.8K, 3→4 放热, 点 4 的压强为 0.2bar, 由表可知此时的温度为 333.2K.

(b)
$$\eta^* = (T_h - T_c) / T_h = (506.8 - 333.2) / 506.8 = 0.343$$

(c) $q_h = h_2 - h_1$, 点 1, $h_{1mx} = (1-x)h_f + xh_g = (1/2)h_f + (1/2)h_g$. 在点 2, $h = h_g$. 因而

$$q_h = (1/2)(h_g - h_f) = (1/2)(2803 - 1008) = 898 \text{ kJ/kg}$$

或者

$$q_h = T_h \Delta s_h = (506.8)(6.185 - 2.646) / 2 = 897 \text{ kJ/kg}$$

- 6.82 一水蒸气卡诺循环在 20 到 200psia 之间工作, 在高压时饱和液态水变为饱和蒸汽, 计算: (a) 等熵膨胀过程中的功 (Btu/lb_m); (b) 循环热效率.

解 (a) 根据图 6-10 中的符号, 等熵膨胀过程中的功为 $h_1 - h_3$, $s_4 = s_3 = (200 \text{ psia 时的 } s_g) = 1.5459 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 因而 $1.549 = (1-x_4)(0.336) + x_4(1.732)$, 则 $x_4 = 0.867$, $h_4 = (1-0.867)(196.3) + (0.867)(1156) = 1028.4 \text{ Btu/lb}_m$, $W_{exp} = h_4 - h_3 = 1028.4 - 1198.8 = -170 \text{ Btu/lb}_m$.

(b)
$$\eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - (228.0 + 459.7) / (381.8 + 451.7) = 17.5\%$$

重叠卡诺致冷机

- 6.83 题 6.64 中 R12 致冷机放出的热量作为题 6.76 中水致冷机吸收的热量, 计算每 kgR12 需要的水的质量是 1kg 的多少倍?

解 根据题 6.65, R12 致冷机放热 $q_h = q_c + W_{net} = 99.0 + 29.3 = 128.3 \text{ kJ/kg R12}$. 根据题 6.76, 水致冷机吸热 $q_c = q_h - W_{net} = 1825 - 730 = 1095 \text{ kJ/kg H}_2\text{O}$, 因而 $m_{R12}(128.3) = m_{H_2O}(1095)$, 即 $m_{H_2O}/m_{R12} = 128.3/1095 = 0.117$.

- 6.84 重解题 6.83, 求 COP.

解
$$\text{COP} = \frac{(Q_c)_{R12}}{(W_{net})_{R12} + (W_{net})_{H_2O}} = \frac{m_{R12}(99.0)}{m_{R12}(29.3) + m_{H_2O}(730)}$$

$$= \frac{99.0}{29.3 + (0.117)(730)} = 86.2\%$$

- 6.85 根据 COP_A 和 COP_B 求重叠卡诺致冷机 A 和 B 的 COP.

解 A 放出的热量被 B 吸收, 则 $(Q_h)_A = (Q_c)_B$, 但是, 根据定义

$$(Q_h)_A = \frac{1 + \text{COP}_A}{\text{COP}_A} (Q_c)_A \quad \text{及} \quad (Q_c)_B = \frac{\text{COP}_B}{1 + \text{COP}_B} (Q_h)_B$$

因而 $(Q_h)_B / (Q_c)_A = (1 + \text{COP}_A)(1 + \text{COP}_B) / (\text{COP}_A)(\text{COP}_B)$. 则

$$\begin{aligned}
 \text{COP} &= \frac{(Q_c)_A}{(W_{\text{net}})_A + (W_{\text{net}})_B} = \frac{(Q_c)_A}{(Q_h)_A - (Q_c)_A + (Q_h)_B - (Q_c)_B} \\
 &= \frac{1}{[(Q_h)_B / (Q_c)_A] - 1} = \frac{1}{(1 + \text{COP}_A + \text{COP}_B) / (\text{COP}_A)(\text{COP}_B)} \\
 &= \frac{(\text{COP}_A)(\text{COP}_B)}{1 + \text{COP}_A + \text{COP}_B}
 \end{aligned}$$

根据对称性, B 放热, A 吸热时, 公式一样。

6.86 利用题 6.85 检验题 6.84.

解 由题 6.65 知 $\text{COP}_{112} = 99.0/29.3$, 由题 6.76 知 $\text{COP}_{112} = 1095/730$. 由题 6.85 得

$$\begin{aligned}
 \text{COP} &= \frac{(99.0/29.3)(1095/730)}{1 + (99.0/29.3) + (1095/730)} = \frac{99.0}{\frac{(29.3)(730)}{1095} + \frac{(99.0)(730)}{1095} + 29.3} \\
 &= \frac{99.0}{\frac{128.3}{1095}(730) + 29.3} = \frac{99.0}{(0.117)(730) + 29.3}
 \end{aligned}$$

和题 6.84 一致。

6.87^D 一卡诺致冷机从 100K 的热源吸热 200kJ, 放热给 300K 的热源, 此热量输入第二个致冷机中, 此致冷机在 300K 和 1000K 之间工作, 下列致冷机的性能系数是多少? (a) 低温致冷机; (b) 高温致冷机; (c) 整个系统, 并利用题 6.85 中的公式检验(c).

解 用字母 c 表示低温, i 表示中温, h 表示高温, 则对低温致冷机, $Q_c/T_c = 200/100 = 2 = Q_c/T_i$, $T_i = 300\text{K}$, 所以 $Q_c = 2(300) = 600\text{kJ}$. 对高温致冷机, $Q_c/T_i = 600/300 = Q_h/T_h$, $T_h = 1000\text{K}$, 则 $Q_h = T_h(Q_c/T_i) = 2(1000) = 2000\text{kJ}$, 因此,

- (a) 低温致冷机, $\text{COP} = Q_c/W_{\text{net}} = 200/(600 - 200) = 0.50$
 (b) 高温致冷机, $\text{COP} = Q_c/W_{\text{net}} = 600/(2000 - 600) = 0.4286$
 (c) 整个系统, $\text{COP} = Q_c/W_{\text{net}} = 200/(400 + 1400) = 0.1111$

由公式得 $\text{COP} = (0.50)(0.4286)/(1 - 0.50 + 0.4286) = 0.1111$, 两者一致。

6.88 一卡诺致冷机从 -100°F 的热源吸热 50Btu, 放热给 50°F 的热源, 此热量输入到第二个致冷机中, 此致冷机在 50°F 和 500°F 之间工作. 下列致冷机的性能系数是多少? (a) 低温致冷机; (b) 高温致冷机; (c) 整个致冷机, 利用题 6.85 中的公式检验(c).

解 用字母 c 表示低温, i 表示中温, h 表示高温. 对低温致冷机, $Q_c/T_c = 50/359.7 = 0.1390 = Q_c/T_i$, $T_i = 509.7^\circ\text{R}$, 因此 $Q_c = (0.1390)(509.7) = 70.85\text{Btu}$. 对高温致冷机, $Q_c/T_i = 70.85/509.7 = Q_h/T_h$, $T_h = 959.7^\circ\text{R}$, 则 $Q_h = (0.1390)(959.7) = 133.40\text{Btu}$, 因此,

- (a) 低温致冷机, $\text{COP} = Q_c/W_{\text{net}} = 50/(70.85 - 50) = 2.398$
 (b) 高温致冷机, $\text{COP} = Q_c/W_{\text{net}} = 70.85/(133.40 - 70.85) = 1.1327$
 (c) 整个系统, $\text{COP} = Q_c/W_{\text{net}} = 50/(20.85 + 62.55) = 0.5995$

由公式得 $(2.398)(1.1327)/(2.398 + 1.1327 + 1) = 0.5995$, 两者一致。

重叠卡诺热泵

6.89 两个卡诺热泵按顺序排列, 热泵 1 从 300K 的低温热源吸热 300kJ, 放出的热量输入到热泵 2 中, 热泵 2 的高温热源的温度为 1000K, 如果这两个热泵的性能系数相同, 那么必须供给热泵 1 和热泵 2 多少能量(kJ/cycle)?

解 如图 6-12, 性能系数相同,

$$\frac{T_i}{T_i - 300} = \frac{1000}{1000 - T_i} \quad \text{则} \quad T_i = \sqrt{300000} = 547.72\text{K}$$

放出/吸收的热量

$$Q_c = [T_i / (300\text{K})](300\text{kJ}) = 547.72\text{kJ}$$

因而

$$W_1 = 547.72 - 300 = 247.72\text{kJ}$$

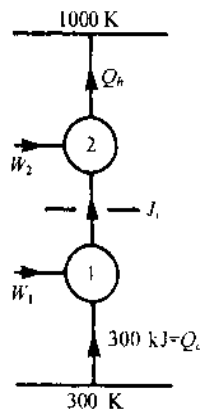


图 6-12

进一步得到输出的热量

$$Q_A = [(1000\text{K})/T_c]Q_c = 1000\text{kJ}$$

因而

$$W_2 = 1000 - 547.72 = 452.28\text{kJ}$$

6.90 用 COP_A 和 COP_B 表示重叠卡诺热泵 A 和 B 的 COP.

解 卡诺热泵是可逆的卡诺机, 则 $\text{COP} = 1/\eta^*$, 因此由题 6.24 得

$$\frac{1}{\text{COP}} = \frac{1}{\text{COP}_A} + \frac{1}{\text{COP}_B} = \frac{1}{(\text{COP}_A)(\text{COP}_B)}$$

或求倒数得 $\text{COP} = (\text{COP}_A)(\text{COP}_B)/(\text{COP}_A + \text{COP}_B - 1)$

6.91^D 一卡诺热泵在 100K 和 300K 的两个热源之间工作, 从 100K 的热源吸热为 600kJ, 放出的热量输入到另一个卡诺热泵中, 此热泵在 300K 和 1000K 的两个热源之间工作, 下列各个热泵的性能系数是多少? (a) 低温热泵; (b) 高温热泵; (c) 整个系统. 并用题 6.90 的公式检验(c).

解 根据图 6-12 中的标号, $Q_c = (T_c/T_h)Q_h = (100/300)(600) = 200\text{kJ}$, $Q_h = (T_h/T_c)Q_c = (1000/300)(600) = 2000\text{kJ}$. 因此,

$$(a) \quad \text{COP} = Q_c/(Q_h - Q_c) = 600/(600 - 200) = 1.50$$

$$(b) \quad \text{COP} = Q_h/(Q_h - Q_c) = 2000/(2000 - 600) = 1.4286$$

$$(c) \quad \text{COP} = Q_h/(Q_h - Q_c) = 2000/(2000 - 20) = 1.1111$$

由公式得

$$\text{COP} = (1.50)(1.4286)/(1.50 + 1.4286 - 1) = 1.1111$$

两者一致.

6.92^D 一卡诺热泵从 -100°F 的低温热源吸热并放出 7C. 85Btu 的热量给 50°F 的高温热源, 放出的热量输入到第二个卡诺热泵中, 此热泵放热给 500°F 的高温热源, 下列各个热泵的性能系数是多少? (a) 低温热泵; (b) 高温热泵; (c) 整个系统. 并用题 6.90 中的公式检验(c).

$$\text{解} \quad (a) \quad \text{COP}^* = T_h/(T_h - T_c) = (50 + 459.7)/[50 - (-100)] = 3.40$$

$$(b) \quad \text{COP}^* = (500 + 459.7)/(500 - 50) = 2.13$$

$$(c) \quad \text{COP}^* = 959.7/(959.7 - 359.7) = 1.60$$

$$\text{检验} \quad \text{COP} = (3.40)(2.13)/(3.40 + 2.13 - 1) = 1.60$$

6.93 题 6.56 已证明: 对单个循环来讲, 同一系统作为热泵时的性能系数比作为致冷机时的性能系数要大些, 这个结论适用于重叠循环吗?

解 适用. 因为一个重叠(实际)循环等效于一个(实际)循环.

6.94^D 一个由两个完全相同的卡诺热泵重叠的热泵在 100K 和 1000K 的两个热源之间工作, 那么其中任一个热泵的性能系数是多少?

解 对整个系统来讲, $\text{COP}^* = 1000/(1000 - 10) = 10/9$, 用 x 表示待求的 COP, 由题 6.90 得

$$\frac{10}{9} = \frac{x^2}{2x - 1} \quad \text{或} \quad 9x^2 - 20x + 10 = 0$$

则

$$x = 1.463$$

(注意 $\text{COP} > 1$)

6.95^D 一个由两个完全相同的卡诺热泵重叠的热泵在 -50°F 和 500°F 的两个热源之间工作, 那么其中任一个热泵的 COP 是多少?

解 整个系统, 有

$$\text{COP}^* = 959.7/[500 - (-50)] = 1.7440$$

用 x 表示待求的 COP, 由题 6.90 得

$$1.744 = x^2/(2x - 1) \quad \text{或} \quad x^2 - 3.488x + 1.744 = 0$$

则

$$x = 2.883$$

(注意 $\text{COP} > 1$)**重叠卡诺热机**

- 6.96 一卡诺热机放出的热量完全被另一卡诺热机吸收, 高温热源和低温热源的温度分别为 1000K 和 300K, 假设两个热机输出的功一样, 计算中温热源的温度。

解 输出功相等, 有

$$Q_h - Q_c = Q - Q_c \quad \text{或} \quad (Q_h/Q_c) - 1 = 1 - (Q/Q_c)$$

或

$$(T_h/T_c) - 1 = 1 - (T_c/T_i)$$

则

$$T_i = (T_h + T_c)/2 = 1300/2 = 6500$$

- 6.97 卡诺机 A 的高温热源温度为 1000K, 卡诺机 B 的低温热源的温度为 300K, 每循环中 A 吸热 1000kJ, 并且 A 放出的热量全被 B 吸收, 假设两个热机的热效率相等, 求每循环的净功(kJ/cycle)。

解 由 $\eta_A = \eta_B$, 给出 $1 - T_i/T_h = 1 - T_c/T_i$, 所以

$$T_i = \sqrt{T_c T_h} = \sqrt{(300)(1000)} = 547.72\text{K}$$

对热机 A, $Q_c = Q_h (T_i/T_h) = 1000(547.72/1000) = 547.72\text{kJ/cycle}$. 因此

$$W_A = Q_h - Q_c = 1000 - 547.72 = 452.28\text{kJ/cycle}$$

对热机 B, $Q_c = Q_h (T_c/T_i) = 547.72(300/547.72) = 300\text{kJ/cycle}$,

$$W_B = Q_h - Q_c = 547.72 - 300 = 247.72\text{kJ/cycle}$$

(这些结果可以通过与题 6.89 的结果对比而验证)

- 6.98 n 个卡诺机按顺序排列, 证明此设备的效率可以表示为

$$\eta_{(n)}^* = 1 - (1 - \eta_1^*)(1 - \eta_2^*) \cdots (1 - \eta_n^*)$$

解 利用数学上的归纳法, 很显然, $n=1$ 时, 这个公式是成立的. 假设 $n=k$ 时, 这个公式成立. 那就是, 有

$$1 - \eta_{(k)}^* = (1 - \eta_1^*)(1 - \eta_2^*) \cdots (1 - \eta_k^*)$$

由题 6.24, 得

$$1 - \eta_{(k+1)}^* = (1 - \eta_k^*)(1 - \eta_{k+1}^*) = (1 - \eta_1^*)(1 - \eta_2^*) \cdots (1 - \eta_{k+1}^*)$$

所以 $n=k+1$ 时, 这个公式也成立. 证毕.

- 6.99 三个卡诺热机按顺序排列, 第一个热机从 1500K 的高温热源吸热 3000kJ, 输出 1500kJ 的功; 第二和第三个热机的输出功分别为 900kJ 和 300kJ. 第三个热机的低温热源的温度是多少(K)?

解 总的输出功为 $1500 + 900 + 300 = 2700\text{kJ}$, 因为三个热机吸收的热量为 3000kJ, 所以释放到低温热源的热量为 $Q_c = 3000 - 2700 = 300\text{kJ}$. 但是, 对综合的卡诺热机, 有 $Q_h/T_h = Q_c/T_c$, 则

$$T_c = T_h (Q_c/Q_h) = 1500(300/3000) = 150\text{K}$$

- 6.100 在题 6.99 中, 第二个卡诺机的低温热源温度是多少(K)?

解 由第一和第二个热机组成的重叠热机,

$$Q_{\text{out}} = Q_h - W_{\text{net}} = 3000 - (1500 + 900) = 600\text{kJ}$$

所以,

$$T_{\text{out}} = T_h (Q_{\text{out}}/Q_h) = 1500(600/3000) = 300\text{K}$$

- 6.101 三个实际热机按顺序排列, 第一个热机的高温热源温度为 1500K, 此热机吸热 3000kJ, 第三个热机放出热量 375kJ 给 150K 的低温热源. 假设三个热机的效率都为 η , 求输出功.

解 每个热机放出的热量等于吸收的热量的 $(1 - \eta)$ 倍, 因此, 这个重叠热机放出的热量为 $(1 - \eta)^3 (3000\text{kJ}) = 375\text{kJ}$, 则 $\eta = 1/2$, 输出功分别为

$$W_1 = \eta(3000\text{kJ}) = 1500\text{kJ}$$

$$W_2 = \eta(1 - \eta)(3000\text{kJ}) = 750\text{kJ}$$

$$W_3 = (Q_h - Q_c) - (W_1 + W_2) = 2625 - 2250 = 375 \text{ kJ}$$

- 6.102 三个效率同为 η^* 的卡诺热机按顺序排列, 第一个热机从温度为 1460°R 的高温热源吸热 2000 Btu , 第三个热机放热给 146°R 的低温热源, 热机相交处的温度是多少($^\circ\text{R}$)?

解 由题 6.98, $\eta_{31}^* = 1 - (146/1460) = 9/10 = 1 - (1 - \eta^*)^3$, 则 $\eta^* = 0.5358$, (和题 6.101 中非理想效率对比.) 对第一个相交处, $\eta = 1 - (T_1/T_h)$, 则 $T_1 = (1 - \eta)T_h = (0.4642)(1460) = 677.67^\circ\text{R}$ 对第二个相交处, $\eta = 1 - (T_1/T_2)$, 则

$$T_2 = T_1 / (1 - \eta) = 146 / 0.4642 = 314.55^\circ\text{R}$$

卡诺热机驱动卡诺制冷机

- 6.103^D 一卡诺热机每循环从 1800 K 的高温热源吸热 2000 kJ , 此热机输出的功推动一卡诺制冷机工作, 此制冷机的低温热源温度为 200 K , 如图 6-13, 如果流入共用热源的热量均为 2500 kJ/cycle , 那么共用热源的温度是多少(K)?

解 对整个系统, 由第一定律得 $Q = 0$, 则

$$2000 + Q_R - 2500 = 0 \quad \text{即} \quad Q_R = 500 \text{ kJ/cycle}$$

两个卡诺方程

$$\frac{2000 \text{ kJ}}{1800 \text{ K}} = \frac{Q_E}{T_x} \quad \text{和} \quad \frac{Q_R}{T_x} = \frac{500 \text{ kJ}}{200 \text{ K}}$$

相加可以得到

$$(Q_E + Q_R)/T_x = (2500 \text{ kJ})/T_x = (65/18) \text{ kJ/K}$$

因此

$$T_x = 692.3 \text{ K}$$

- 6.104^D 一卡诺热机每循环从 1800°R 的高温热源吸热 2000 Btu , 此热机输出的功推动一卡诺制冷机工作, 致冷机低温热源的温度为 450°R . 如果每循环流入共用热源的热量为 3000 Btu , 求共用热源的温度.

解 按图 6-13 中的标记, $Q_R = 3000 - 2000 = 1000 \text{ Btu/cycle}$ (根据能量守恒), 那么, 两个卡诺循环方程

$$\frac{200 \text{ Btu}}{1800^\circ\text{R}} = \frac{Q_E}{T_x} \quad \text{和} \quad \frac{Q_R}{T_x} = \frac{1000 \text{ Btu}}{450^\circ\text{R}}$$

相加可以得到

$$(Q_E + Q_R)/T_x = (3000 \text{ Btu})/T_x = (10/3) \text{ Btu}/^\circ\text{R}$$

因而

$$T_x = 900^\circ\text{R}$$

- 6.105^D 一不可逆热机从 1800 K 的热源吸热, 一部分放给 900 K 的热源, 还有一部分以功的形式输入到一联动机件中, 此联动机件推动一不可逆致冷机工作, 此致冷机每循环从 200 K 的热源吸收 590 kJ 的热量, 并放热给 900 K 的高温热源, 假设此热机的效率是同温限的可逆(卡诺)热机效率的 90% , 致冷机的性能系数为 1.6389 , 每循环中输入到共用热源的热量为 1500 kJ , 计算: (a) 热机输入到联动机件中的功(kJ/cycle), (b) 热机吸收的热量(kJ/cycle); (c) 联动机件损失的功占输入功的百分率.

解 利用图 6-13 中的标记, 对整个系统写出热力学第一定律方程:

$$Q_E + 590 - 1500 + W_{\text{net}} = 0 \quad (1)$$

热机的效率

$$1 - \frac{Q_E}{Q_{\text{in}}} = (0.90) \left(1 - \frac{900}{1800} \right) \quad (2)$$

致冷机的性能系数

$$1.6389 = \frac{590}{Q_R - 590} \quad (3)$$

和

$$Q_E + Q_R = 1500 \quad (4)$$

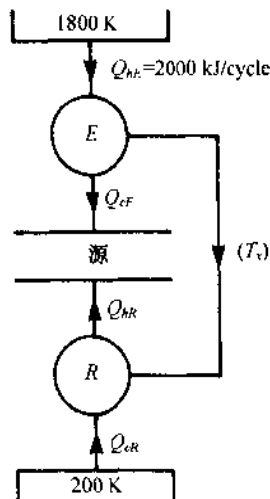


图 6-13

按式(3)—(4)—(2)—(1)的顺序求解,得

$$\begin{aligned} Q_{HR} &= 950 \text{ kJ/cycle}, & Q_{RE} &= 550 \text{ kJ/cycle} \\ Q_{HE} &= 1000 \text{ kJ/cycle}, & W_{\text{lost}} &= -90 \text{ kJ/cycle} \end{aligned}$$

(负号表示损失),因此

$$(a) \quad W_E = Q_{HR} - Q_{RE} = 400 \text{ kJ/cycle}$$

$$(b) \quad Q_{HE} = 1000 \text{ kJ/cycle}$$

$$(c) \quad |W_{\text{lost}}|/W_E = 20\%$$

6. 106^D 一不可逆热机从温度为 1800°R 的热源吸热,一部分放给 900°R 的热源,还有一部分以功的形式输入给一传动装置,此传动装置推动一不可逆制冷机工作,此制冷机每循环从 450°R 的热源吸热 487 Btu/cycle ,并放热给 900°R 的热源,若热机的效率是同温限的可逆(卡诺)热机效率的 90% ,制冷机的性能系数为 1.353 ,每循环输入到共用热源的热量为 1400 Btu ,计算:(a)传动装置输出给制冷机的功(Btu/cycle);(b)热机吸收的热量(Btu/cycle);(c)传动装置损失的功占输入功的百分率。

解 利用图 6-13 中的标记,对整个系统写出第一定律方程

$$Q_{HE} + 487 - 1400 + W_{\text{lost}} = 0 \quad (1)$$

热机效率

$$1 - \frac{Q_{RE}}{Q_{HE}} = (0.90) \left(1 - \frac{900}{1800} \right) \quad (2)$$

制冷机的性能系数

$$1.353 = \frac{487}{Q_{HR} - 487} \quad (3)$$

和事实

$$Q_{RE} + Q_{HR} = 1400 \quad (4)$$

按式(3)—(4)—(2)—(1)的顺序求解,得

$$\begin{aligned} Q_{HR} &= 847 \text{ Btu/cycle}, & Q_{RE} &= 553 \text{ Btu/cycle} \\ Q_{HE} &= 1005 \text{ Btu/cycle}, & W_{\text{lost}} &= -92 \text{ Btu/cycle} \end{aligned}$$

(负号表示输出),因此,

$$(a) \quad W_R = Q_{HR} - 487 = 360 \text{ Btu/cycle}$$

$$(b) \quad Q_{HE} = 1005 \text{ Btu/cycle}$$

$$(c) \quad |W_{\text{lost}}|/(Q_{HE} - Q_{RE}) = 20.3\%$$

6. 107 一卡诺热机从 1000 K 的热源吸热 4000 kJ/cycle ,而向 500 K 的热源放热,热机的功输出给有损耗的负载,有损耗的负载输出功推动一卡诺制冷机工作,此制冷机从 250 K 的热源吸热 500 kJ/cycle ,计算:(a)释放到热源中的总热量(kJ/cycle);(b)有损耗的负载输出给制冷机的功占输入功的比例。

解 利用图 6-13 中的标记, $Q_{HE} = 4000 \text{ kJ}$, $T_{HE} = 1000 \text{ K}$, $T_{RE} = 500 \text{ K}$,因为热机是一卡诺机,

$$Q_{HE}/T_{HE} = 4000/1000 = 4 = Q_{RE}/T_{RE} = Q_{RE}/500$$

则

$$Q_{RE} = 2000 \text{ kJ}$$

热机的输出功一定为 $Q_{HE} - Q_{RE} = 4000 - 2000 = 2000 \text{ kJ}$.而对制冷机,则有 $Q_{ER} = 500 \text{ kJ}$, $T_{ER} = 250 \text{ K}$, $T_{HR} = 500 \text{ K}$,因为制冷机也是一卡诺机,则

$$Q_{HR}/T_{HR} = Q_{ER}/500 = Q_{ER}/T_{ER} = 500/250 = 2$$

所以

$$Q_{HR} = 1000 \text{ kJ}$$

输入给制冷机的功必为 $Q_{HR} - Q_{ER} = 1000 - 500 = 500 \text{ kJ}$.因此,

$$(a) \quad Q_{RE} + Q_{HR} = 2000 + 1000 = 3000 \text{ kJ/cycle}$$

$$(b) \quad (500 \text{ kJ})/(2000 \text{ kJ}) = 25\%$$

克劳修斯不等式

复习题 3.124 和 3.160.

6. 108 根据题 6.29 的装置验证克劳修斯不等式.

解 $Q_h = Q_c + W_{\text{net}} = 261 + 500 = 761 \text{ Btu/cycle}$

因而 $Q_h/T_h = 761/(1000+460) = 0.5212$

以及 $Q_c/T_c = -261/(40+460) = -0.5220$

则 $\oint Q/T = 0.5212 - 0.5220 = -0.0008$

这个值和零只相差 $1/650$, 所以可以把这结果看作为零, 这对于一个可逆热机是正确的, 注意: 高温热源损失的 761 Btu 的热量等于热机获得的热量, 低温热源获得的 261 Btu 的热量等于热机损失的热量。

6.109 根据题 6.32 中的热机, 验证克劳修斯不等式。

解 $Q_c = Q_h - W_{\text{net}} = 1119 - 300 = 819 \text{ kJ}$

因而 $Q_h/T_h = 1119/(100+273) = 3.000$

$Q_c/T_c = -819/(0+273) = -3.000$

$\oint Q/T = 0.000$

结果正确。

6.110 根据题 6.59 中的致冷机验证克劳修斯不等式。

解 $Q_c/T_c = 390/421 = 0.9264$, $Q_h/T_h = -500/540 = -0.9259$

$\oint Q/T = 0.9264 - 0.9259 = 0.0005$

这个结果和零只相差 $5/9260$, 所以这个结果可以看作为零。

6.111 根据题 6.79 中的热泵验证克劳修斯不等式。

解 $Q_c/T_c = 1000/300 = 3.3333$, $Q_h/T_h = -1733/520 = -3.3327$

$\oint Q/T = 3.3333 - 3.3327 = 0.0006$

对一个可逆装置, 这个结果非常接近于零。

6.112 题 6.29 中的数据有改动: 热机从 1000°F 的高温热源吸热仍为 761 Btu , 但现在释放给 40°F 的低温热源的热量为 310 Btu , 这个热机可能吗? 它可逆吗?

解 $Q_h/T_h = 761/(1000+460) = 0.5212$, $Q_c/T_c = -310/(40+460) = -0.6200$

$\oint Q/T = 0.5212 - 0.6200 = -0.0988$

因为 $\oint Q/T < 0$, 所以这个热机不可逆。

6.113 根据题 6.107 中连接的热机——致冷机, 验证克劳修斯不等式。

解 假设负载的温度为 τ , 每循环有 1500 kJ 的热量离开负载, 那么

$$\oint \frac{Q}{T} = \frac{Q_{E1}}{T_{H1}} + \frac{Q_{R1}}{T_{R1}} - \frac{Q_{E2}}{T_{H2}} - \frac{Q_{R2}}{T_{R2}} - \frac{1500}{\tau} = 4 + 2 - 4 - 2 - \frac{1500}{\tau} < 0$$

这就进一步证实了这个机器的不可逆性。

第七章 气体循环

在这一章里求解的所有问题都与理想或半理想气体循环工作有关。为了方便起见,将前几章中需要的公式和数据收集如下,照例, $k=c_p/c_v$ 。

比热为常数的理想气体的可逆绝热(等熵)过程方程如下:

$$\begin{aligned} P v^k &= \text{常数} & \text{即} & P_2/P_1 = (v_1/v_2)^k \\ T v^{k-1} &= \text{常数} & \text{即} & T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{k-1} \\ T P^{(1-k)/k} &= \text{常数} & \text{即} & T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(k-1)/k} \end{aligned}$$

压缩功(理想气体)

$$\begin{aligned} w_{\text{in}} &= [R/(k-1)](T_2 - T_1) = c_v(T_2 - T_1) \\ w_{\text{in}} &= [kR/(k-1)](T_2 - T_1) = c_p(T_2 - T_1) \end{aligned}$$

等熵方程(半理想气体)

$$\begin{aligned} (P_2/P_1)_s &= P_{r2}/P_{r1}, & (V_2/V_1)_s &= V_{r2}/V_{r1} \\ R_u &= 8.31451 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} = 0.08314 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K} \\ &= 1545.33 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \text{ mole} \cdot {}^\circ\text{R} = 1.9859 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole} \cdot {}^\circ\text{R} \\ 1 \text{ Btu} &= 778.16 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f = 1.05435 \text{ kJ} & \text{热功当量} \\ M(\text{空气}) &= 28.97 \text{ kg/kmol} = 28.97 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole} \\ R(\text{空气}) &= 0.28704 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 0.06856 \text{ Btu/lb}_m \cdot {}^\circ\text{R} = 53.35 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot {}^\circ\text{R} \\ c_p(\text{空气}) &= 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 0.240 \text{ Btu/lb}_m \cdot {}^\circ\text{R} \\ c_v(\text{空气}) &= 0.718 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 0.171 \text{ Btu/lb}_m \cdot {}^\circ\text{R} \\ k(\text{空气}) &= 1.40 \end{aligned}$$

7.1 列出分析下列问题时所作的假设:(a)标准空气循环;(b)标准冷空气循环。

解 (a)循环的工作流体是质量不变的纯空气,燃烧而释放到空气中的热可以当作是从外部加进去的,空气向外界放热时质量保持不变,所有的过程内部可逆($dQ = TdS$)

(b)(a)中的假设再加上一条假设:比热 c_p 和 c_v 以及它们的比 k 都是常数。

7.2^D 一循环如图 7-1, (a) 每循环从热源中吸收的热量是多少(kJ)? (b) 每循环释放多少热量(kJ)? (c) 循环热效率是多少? (d) 如果这个循环逆向运行,对应的制冷机性能系数是多少? (e) 如果这个循环逆向运行,对应的热泵的性能系数是多少? (f) 在相同的最低温和最高温之间工作的卡诺热机每循环输出功多少?

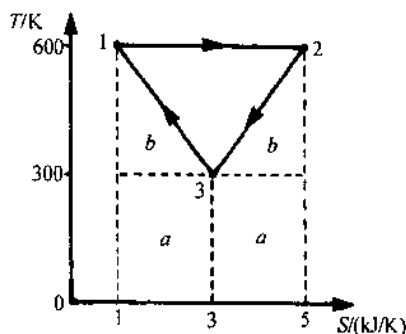


图 7-1

解 (a) 沿着过程 1→2, 熵增加。

$$Q_2 = Q_h = T_h(S_2 - S_1) = 600(\text{K})[(5-1)\text{kJ/K}] = 2400 \text{ kJ}$$

(b) 沿着过程 2→3→1, 熵减少。

$$\begin{aligned} Q &= \int TdS = T-S \text{ 图中 } 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \text{ 与 } S \text{ 轴所包围的面积} \\ &= 2(a \text{ 的面积}) + 2(b \text{ 的面积}) \\ &= 2(300-0)(5-3) + 2(600-300)(5-3)/2 = 1800 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$(c) \quad \eta = 1 - Q_c/Q_h = 1 - 1800/2400 = 1/4$$

$$(d) \quad W_{\text{net}} = Q_h - Q_c = 600 \text{ kJ}$$

$$\text{因此, } \text{COP}_{\text{ref}} = Q_c/W_{\text{net}} = 1800/600 = 3.0$$

$$(e) \quad \text{COP}_{\text{pump}} = 1/\eta = 4$$

$$(f) \quad \eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - 300/600 = 0.50$$

$$W_{net} = \eta^* Q_h = 0.50(2400) = 1200 \text{ kJ}$$

- 7.3 一循环如图 7-2, (a) 每循环从热源吸收的热量是多少(Btu)? (b) 每循环释放的热量是多少(Btu)? (c) 循环的性能系数是多少? (d) 如果这个装置是致冷机, 那么性能系数是多少? (e) 在相同的最低温和最高温之间工作的卡诺热泵的性能系数是多少?

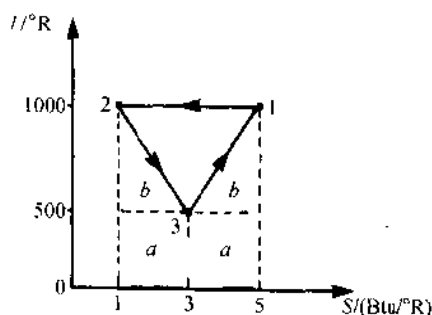


图 7-2

解 (a) 沿着过程 2→3→1, 熵增加.

$${}_2Q_3 + {}_3Q_1 = Q_c = \int TdS$$

$$= T-S \text{ 图中 } 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \text{ 曲线与 } S \text{ 轴所围的面积}$$

$$= 2(\text{面积 } a) + 2(\text{面积 } b)$$

$$= 2(500-0)(3-1) + 2(1000-500)(3-1)/2 = 3000 \text{ Btu}$$

(b) 沿着过程 1→2,

$${}_1Q_2 = -Q_h = -T_h(S_2 - S_1) = 1000(1-5) = -4000 \text{ Btu}$$

则

$$Q_h = 4000 \text{ Btu}$$

$$4000 - 3000 = 1000 \text{ Btu}$$

因此每循环中有 1000 Btu 的净热从低温区流入高温区, 此装置是热泵.

$$(c) \quad \text{COP}_{\text{pump}} = Q_h / (Q_h - Q_c) = 4000 / (4000 - 3000) = 4.0$$

$$(d) \quad \text{COP}_{\text{ref}} = Q_c / (Q_h - Q_c) = 3000 / (4000 - 3000) = 3.0$$

$$(e) \quad \text{COP}^* = T_h / (T_h - T_c) = 1000 / (1000 - 500) = 2.0$$

- 7.4 一总工程师提出了如图 7-3 中的一个新循环, 它是一个含有等温线的普通三角形循环. (a) 用温度 T_c 和 T_h 表示循环的热效率; (b) 此效率与同温限下的卡诺循环效率相比有什么不同? 这个新的循环有没有违反热力学第二定律?

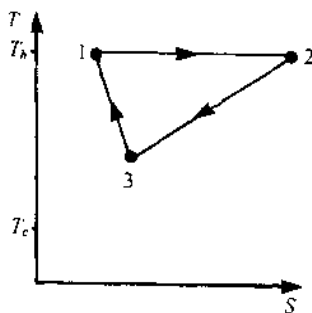


图 7-3

解 (a) $\eta = W_{net} / Q_h$, 因为 $W_{net} = Q_{net}$, 三角形的面积 = (1/2)

(底)(高) = (1/2)($S_2 - S_1$)($T_h - T_c$) 以及 $Q_h = T_h(S_2 - S_1)$, 所以,

$$\eta = (1/2)(1 - T_c/T_h)$$

$$(b) \quad \eta^* = 1 - T_c/T_h$$

三角形循环的热效率刚好等于同温限下卡诺循环效率的一半. 因为三角形循环的效率比同温限下卡诺循环的效率低, 所以没有违反热力学第二定律.

- 7.5 若总工程师提出将上述循环曲线旋转 90° . 现在这普通三角形有一条绝热线 (如图 7-4). 计算效率并与在 T_h 和 T_c 之间工作的卡诺热机的效率 η^* 相比较.

解

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{\text{下面梯形的面积}}{\text{上面梯形的面积}}$$

$$= 1 - \frac{\text{下面梯形的底之和}}{\text{上面梯形的底之和}} = 1 - \frac{T_c + T_i}{T_h + T_i}$$

$$= \frac{T_h - T_c}{T_h + T_i}$$

很显然这个值比 $\eta^* = (T_h - T_c)/T_h$ 小.

- 7.6 如图 7-4, $T_h = 650^\circ\text{R}$, $T_c = 250^\circ\text{R}$, 三角形底边外的边 23 和 31 长度相等, 计算效率.

解

对等腰三角形, $T_i = (T_h + T_c)/2$, 由题 7.5 得

$$\eta = (650 - 250) / (650 + 450) = 4/11$$

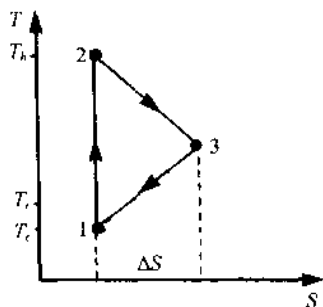


图 7-4

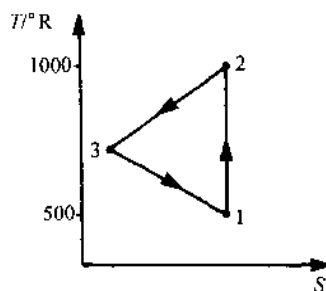


图 7-5

- 7.7 图 7-5 中的循环曲线是一等边三角形. 证明此装置的性能系数可达 3.50, 如果是这样的话, 那么这个装置是热泵还是制冷机?

解 温度较低时(3→1 熵增加)系统吸热, 温度较高时(2→3 熵减小)系统放热, 所以这个装置是制冷机或热泵, 如果过程可逆, 由题 7.5 可得效率

$$\eta = (1000 - 500) / (1000 + 750) = 2/7$$

因此, $\text{COP}_{\text{pump}} = 1/\eta = 3.5$, $\text{COP}_{\text{ref}} = \text{COP}_{\text{pump}} - 1 = 2.5$.

这个装置一定是热泵.

- 7.8 兰金先生宣布他的循环(如图 7-6(a))效率比凯伦先生的循环(如图 7-6(b))效率高. 假设两个循环中水平线所对应的熵变 ΔS 相同, 请你判定一下这个说法对不对.

解

$$\eta_k = \frac{W_{\text{net}}}{Q_h} = \frac{\text{三角形面积}}{Q_h} = \frac{\frac{1}{2}(\Delta S)(600 - 300)}{(\Delta S)(600)} = \frac{1}{4}$$

$$\eta_k = \frac{W_{\text{net}}}{Q_h} = \frac{\text{三角形面积}}{Q_h + \text{三角形面积}} = \frac{(\Delta S)(600 - 300)/2}{300(\Delta S) + 300(\Delta S)/2} = \frac{1}{3}$$

因为 $\eta^* = 1 - (T_c/T_h) = 1/2$, 所以两个循环都是可能的, 兰金先生的说法不对.

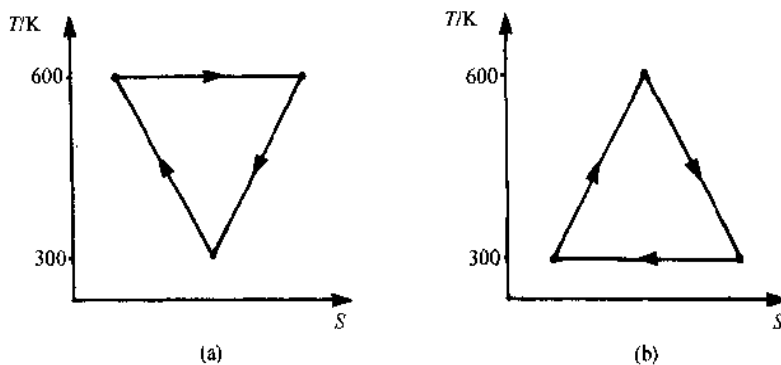


图 7-6

- 7.9⁰ 图 7-7 描绘了一个内部可逆的热机循环, 每一个循环, 计算: (a) 热机吸收的热量(Btu); (b) 热机放出的热量(Btu); (c) 净功(Btu); (d) 计算热效率; (e) 如果这个循环逆向运行, 作为一个热泵, 它的性能系数是多少?

解 (d) 由题 7.5, 因为 $T_c = T_h$, 所以,

$$\eta = (1500 - 500) / (1500 + 500) = 1/2$$

(b) $Q_h = 500(2 - 0.5) = 750 \text{ Btu}$

(a) $Q_h = Q_c / (1 - \eta) = 750 / (1/2) = 1500 \text{ Btu}$

(c) $W_{\text{net}} = Q_h - Q_c = 1500 - 750 = 750 \text{ Btu}$

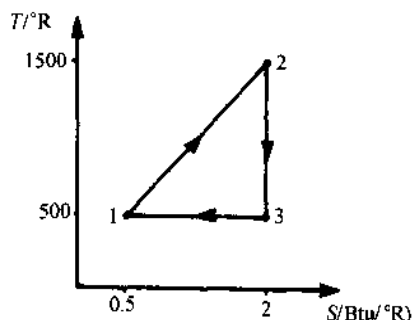


图 7-7

(e) $\text{COP} = 1/\eta = 2$

7.10⁰ 如图 7-8 描绘的一个内部可逆的热机循环. 对一个循环, 计算: (a) 热机吸收的热量 (kJ); (b) 热机放出的热量 (kJ); (c) 净功 (kJ); (d) 热效; (e) 如果这个循环逆向运行, 作为一个致冷机, 它的性能系数是多少?

解 (d) 由题 7.5, 得 $T_1 = T_3$, $\eta = (600 - 300)/(600 + 300) = 1/3$

(b) $Q = 300(2 - 0.5) = 450 \text{ kJ}$

(a) $Q_h = Q/(1 - \eta) = (450)(3/2) = 675 \text{ kJ}$

(c) $W_{\text{net}} = Q_h - Q_c = 675 - 450 = 225 \text{ kJ}$

(e) $\text{COP} = (1 - \eta)/\eta = 2$

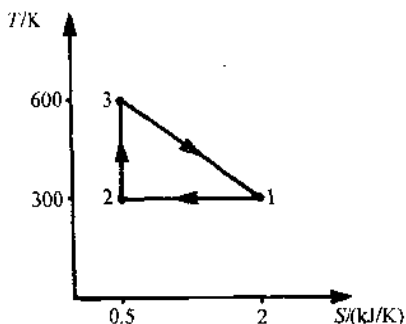


图 7-8

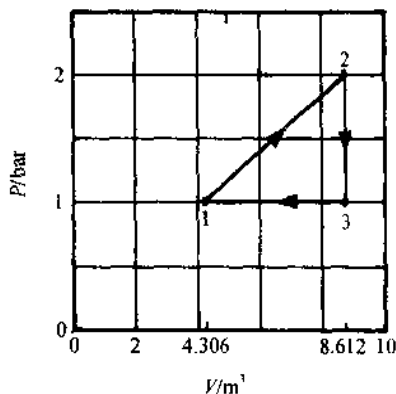


图 7-9

7.11 5kg 的空气(理想气体)在状态 1 的参量为: $P = 1 \text{ bar}$, $T = 300 \text{ K}$, $V = 4.306 \text{ m}^3$. 然后空气吸收能量使得它的温度和体积都增加一倍(状态 2). 接着空气保持体积不变并放热, 使得压强降为 1bar, 达到状态 3. 最后空气压强保持不变并放热, 回到原来的状态 1. (a) 在 P - V 图上画出这个循环; (b) 在 $1 \rightarrow 2$ 之间空气吸收的热量是多少 (kJ)? (c) 在 $2 \rightarrow 3$ 之间空气放出的热量是多少 (kJ)? (d) 在 $3 \rightarrow 1$ 之间空气放出的热量是多少 (kJ)? (e) 循环中产生的功是多少 (kJ)?

解 (a) 假设 $1 \rightarrow 2$ 之间 P 与 V 是线性关系, 可以得到循环如图 7-9 所示.

(b) 由第一定律, 得

$${}_1Q_2 + {}_1W_2 = U_2 - U_1$$

由理想气体定律, $T_2 = 4T_1$, 所以

$$U_2 - U_1 = mc_v(T_2 - T_1) = 3mc_vT_1 = 3(5)(0.718)(300) = 3231 \text{ kJ}$$

且 ${}_1W_2 = -\int_1^2 P dV = -P(V_2 - V_1) = -(3P_1/2)(V_1) = -(150 \text{ kPa})(4.306 \text{ m}^3) = -646 \text{ kJ}$

因而

$${}_1Q_2 = 3231 - (-646) = 3877 \text{ kJ}$$

(c) 由理想气体定律, $T_3 = 2T_1$, 因此

$${}_2Q_3 = mc_v(T_3 - T_2) = -2mc_vT_1 = -2(5)(0.718)(300) = -2154 \text{ kJ}$$

(d) $3 \rightarrow 1$, ${}_3W_1 = mc_v(T_3 - T_2) = -2mc_vT_1 = -2(5)(0.718)(300) = -2154 \text{ kJ}$

且

$$U_1 - U_3 = mc_v(T_1 - T_3) = -mc_vT_1 = -1077 \text{ kJ}$$

因此

$${}_3Q_1 = -1077 - 430.6 = -1508 \text{ kJ}$$

(e) $W_{\text{net}} = {}_1W_2 + {}_2W_3 + {}_3W_1 = -645.9 + 0 + 430.6 = -215.3 \text{ kJ}$ (“-”号表示输出).

7.12 利用空气表重解题 7.11.

解 功的计算没有变化, 内能增量及热量交换的计算有变化, 变化如下:

$1 \rightarrow 2$, $U_2 - U_1 = m(u_{1200\text{K}} - u_{300\text{K}}) = 5(933.5 - 214.1) = 3597 \text{ kJ}$

现在

$${}_1Q_2 = 3597 - (-646) = 4243 \text{ kJ}$$

$2 \rightarrow 3$,

$$U_3 - U_2 = m(u_3 - u_2) = 5(435.1 - 933.5) = -2492 \text{ kJ} = {}_2Q_3$$

$$3 \rightarrow 1, \quad U_1 - U_3 = m(u_1 - u_3) = 5(214.1 - 435.1) = -1105 \text{ kJ}$$

$$\text{现在,} \quad Q_1 = -1105 - 430.6 = -1536 \text{ kJ}$$

7.13 列表表示每一个过程中的热交换、功及内能的变化,并计算整个循环中的热交换、功及内能的变化,从而证明题 7.11 和 7.12 的结果。

解 见表 7-1。

表 7-1

状态	题 7.11			题 7.12		
	Q/kJ	W/kJ	$\Delta U/\text{kJ}$	Q/kJ	W/kJ	$\Delta U/\text{kJ}$
1						
2	3877	-645.9	3231	4243	-646	3597
3	-2154	0.0	-2154	-2492	0	-2492
1	-1508	430.6	-1077	-1536	431	-1105
\oint	215	-215.3	0	215	-215	0

iPa 循环

7.14 一理想气体循环由下列过程组成:(i)等温压缩,温度为 T_1 , (ii)等压吸热,温度从 T_1 升高到 T_3 , (iii)可逆绝热膨胀,温度回到 T_1 。(a)在 $P-v$ 图上画出这个循环;(b)证明热效率为

$$\eta = 1 - \frac{T_1 \ln(T_3/T_1)}{T_3 - T_1}$$

解 (a)见图 7-10。

(b)对等温压缩 1→2 过程,

$$\begin{aligned} q_c &= |{}_1q_2| = {}_1w_2 = RT \ln(v_1/v_2) = RT_1 \ln(P_2/P_1) \\ &= RT_1 \ln(P_3/P_1) = RT_1 \ln(T_3/T_1)^{k/(k-1)} \\ &= [kRT_1/(k-1)] \ln T_3/T_1 = c_p T_1 \ln(T_3/T_1) \end{aligned}$$

$$\text{但是 } q_h = {}_2q_3 + 0 = c_p(T_3 - T_2) = c_p(T_3 - T_1)$$

$$\text{因此 } \eta = 1 - \frac{q_c}{q_h} = 1 - \frac{T_1 \ln(T_3/T_1)}{T_3 - T_1}$$

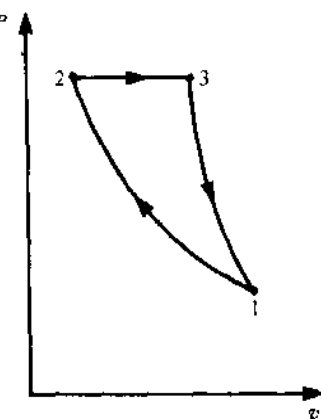


图 7-10

7.15 对题 7.14 中的循环,用点 1 的状态参量表示点 2 和点 3 的状态参量(P, v, T),已知压缩比 $r = v_1/v_2$,温度为 T_3 。

解 见表 7-2。

表 7-2

	P	v	T
1	P_1	v_1	T_1
2	rP_1	v_1/r	T_1
3	rP_1	$v_1 T_3/rT_1$	T_3

7.16^D 空气经历题 7.14 中的循环,已知 $T_1 = 300\text{K}$, $T_3 = 1000\text{K}$,计算:(a)每循环吸收的热量(kJ/kg);(b)每循环放出的热量(kJ/kg);(c)循环热效率(%)。

$$\text{解 (a)} \quad q_h = c_p(T_3 - T_1) = (1.005)(1000 - 300) = 730.5 \text{ kJ}$$

$$(b) \quad q_c = c_p T_1 \ln(T_3/T_1) = (1.005)(300)[\ln(10/3)] = 362.8 \text{ kJ}$$

$$(c) \quad \eta = 1 - q_c/q_h = 1 - 362.8/730.5 = 48.4\%$$

7.17^D 如果空气是半理想气体(题 2.90),重解题 7.16。

解 (a) 由表 B2, $q_h = h_3 - h_2 = 1047 - 300 = 747 \text{ kJ/kg}$

(b) 由题 7.14(b), $q_c = RT_1 \ln(P_3/P_1)$, 但是现在必须用 $P_3/P_1 = P_{r3}/P_{r1}$ 代替理想气体关系, 因而,

$$q_c = (0.28704)(300) \ln(201.9/2.451) = 379.8 \text{ kJ/kg}$$

(c) $\eta = 1 - q_c/q_h = 1 - 379.8/747 = 49.2\%$

(注意: 半理想气体循环效率比理想气体循环效率高)

7.18^D 通过计算 $\oint q$, $\oint w$ 和 $\oint \Delta u$, 证明题 7.16 和 7.17 的结果.

解 见表 7-3.

表 7-3

状态	题 7.16			题 7.17		
	$q/(\text{kJ/kg})$	$w/(\text{kJ/kg})$	$\Delta u/(\text{kJ/kg})$	$q/(\text{kJ/kg})$	$w/(\text{kJ/kg})$	$\Delta u/(\text{kJ/kg})$
1	-362.8	362.8	0.0	-379.8	379.8	0.0
2	703.5	-200.9	502.5	747.0	-200.9	545.6
3	0.0	-502.6	-502.6	0.0	-545.6	-545.6
1						
\oint	340.7	-340.7	-0.1	367.2	-366.7	0.0

7.19^D 空气经历题 7.14 中的循环. 已知 $T_1 = 60^\circ\text{F}$, $T_3 = 1500^\circ\text{F}$, 计算: (a) 每循环吸收的热量 (Btu/lb_m); (b) 每循环放出的热量 (Btu/lb_m); (c) 循环热效率 (%).

解 (a) $q_h = c_p(T_3 - T_1) = (0.24)(1500 - 60) = 345.6 \text{ Btu/lb}_m$

(b) $q_c = c_p T_1 \ln(T_3/T_1) = (0.24)(520) \ln(1960/520) = 165.5 \text{ Btu/lb}_m$

(c) $\eta = 1 - q_c/q_h = 1 - 165.5/345.6 = 52.1\%$

7.20^D 通过计算 $\oint q$, $\oint w$ 和 $\oint \Delta u$ 证明题 7.19 的结果.

解 见表 7-4.

表 7-4

状态	$q/(\text{Btu/lb}_m)$	$w/(\text{Btu/lb}_m)$	$\Delta u/(\text{Btu/lb}_m)$
1	-135.6	165.6	0.0
2	345.6	-99.4	246.2
3	0.0	-246.8	-246.8
1			
\oint	-180.0	-180.6	-0.6

7.21^D 如果气体是半理想气体重解题 7.19.

解 (a) 由表 B1, $q_h = h_3 - h_2 = [477.2 + (60/100)(27.9)] - 124.2 = 369.7 \text{ Btu/lb}_m$

(b) 由题 7.14(b), $q_c = RT_1 \ln(P_3/P_1)$

但现在必须用 $P_3/P_1 = P_{r3}/P_{r1} = [250.6 + (0.6)(57.2)]/2.140$ 代替理想气体关系, 因而

$$q_c = (0.06856)(520) \ln(284.9/2.140) = 174.4 \text{ Btu/lb}_m$$

(c) $\eta = 1 - \frac{q_c}{q_h} = 1 - 174.4/369.7 = 52.8\%$

iVa 循环

7.22 理想空气经历一个等温压缩过程, 压缩比为 r , 然后经历一个等容吸热过程, 最后经历一个绝热膨胀过程, 空气回到初始状态. 用 r 和 k 表示循环热效率 η .

解 这是一个 iVa 循环,如图 7-11.各过程做功情况如下:

$${}_1w_2 = RT_1 \ln r \quad {}_2w_3 = 0 \quad {}_3w_1 = u_1 - u_3 = c_v(T_1 - T_3)$$

因此, $w_{net} = {}_1w_2 + {}_2w_3 + {}_3w_1 = -c_v(T_3 - T_1) - RT_1 \ln r$

且 $q_h = {}_2q_3 = c_v(T_3 - T_2) = c_v(T_3 - T_1)$

这样,根据等熵过程中 T-v 关系式 $T_3/T_1 = r^{k-1}$,得

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_h} = 1 - \frac{R}{c_v} \frac{T_1}{T_3 - T_1} \ln r = 1 - \frac{k-1}{r^{k-1}-1} \ln r$$

7.23 题 7.22 中,如果压缩比为 5:1,求循环效率.

解 理想空气, $k=1.4$, 因此

$$\eta = 1 - \frac{0.4}{5^{0.4}-1} \ln 5 = 0.287$$

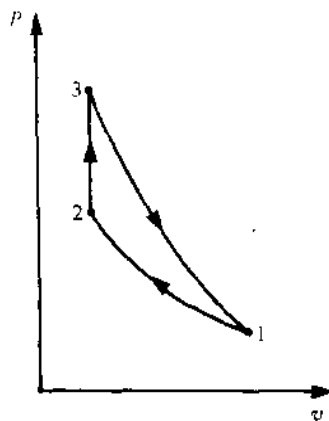


图 7-11

7.24 题 7.23 中,如果初始温度为 300K,通过计算 $\oint q$ 、 $\oint w$ 和

$\oint \Delta u$ 做一个全面的检验.

解 见表 7-5.

表 7-5

状态	$q/(kJ/kg)$	$w/(kJ/kg)$	$\Delta u/(kJ/kg)$
1			
2	-138.6	138.6	0.0
3	194.6	0.0	194.6
1	0.0	194.5	-194.5
\oint	56.0	-55.9	0.1

7.25 题 7.23 中,如果空气是半理想气体,初始温度为 300K,重解题 7.23.

解 $1 \rightarrow 3, 5 = v_1/v_2 = V_{r1}/V_{r3} = 351.3/V_{r3}$, 则 $V_{r3} = 70.3$, 因而

$$T_3 = 550 + (4.9/15.43)(50) = 566K$$

在这个温度下,

$$u_3 = 397.2 + (15.9/50)(435.1 - 397.2) = 409.3 kJ/kg$$

因为 $u_2 = u_1 = 214.1 kJ/kg$, 所以,

$$q_h = u_3 - u_2 = 409.3 - 214.1 = 195.2 kJ/kg$$

又由表 7-5, $q_c = 138.6 kJ/kg$, 因此,

$$\eta = 1 - q_c/q_h = 1 - 138.6/195.2 = 0.290$$

注意:当压缩比相对较低时,根据定值比热以及空气表计算得的结果比较一致.

7.26 一个 iVa 循环中的空气为半理想气体,经等温压缩后的体积为原体积的 1/4,初始温度为 80°F,计算此循环效率.

解 在压缩过程中,

$${}_1w_2 = RT_c \ln r = (1545/28.97)(540) \ln(4) = 39924 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$$

可逆绝热(等熵)过程 $3 \rightarrow 1$, 由空气表得

$$V_{r3} = (1/4)V_{r1} = (0.25)(352.6) = 88.15$$

因此,

$$T_3 = 900 + [(96.3 - 88.2)/(96.3 - 84.2)](50) = 933.5^\circ R$$

现在

$$q_h = {}_2q_3 = u_3 - u_2$$

我们求得

$$u_3 = 154.7 + (33.5/50)(9) = 160.7 \text{ Btu/lb}_m$$

$$u_1 = u_2 = 92.1 \text{ Btu/lb}_m$$

因而,

$$q_h = 160.7 - 92.1 = 68.6 \text{ Btu/lb}_m$$

由第一定律得

$${}_3u_1 - u_1 - u_3 = q_h = 68.6 \text{ Btu/lb}_m = -53405 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m$$

净功

$$w_{\text{net}} = {}_1u_2 + {}_3u_1 = 13481 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \\ = 17.32 \text{ Btu/lb}_m$$

因此,

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = 17.32/68.6 = 0.2525$$

7.27 对题 7.26, 计算 $\oint q$, $\oint w$ 和 $\oint \Delta u$.

解 见表 7-6.

表 7-6

状态	q/Btu	$w/(\text{Btu/lb}_m)$	$\Delta u/(\text{Btu/lb}_m)$
1			
2	-51.3	51.3	0
3	68.6	0.0	65.0
1	-0.1	68.6	-65.0
\oint	17.2	-17.3	0.0

7.28 已知 iPa 和 iVa 循环的工质都是理想气体, 温度比都是 $r_T = T_h/T_c$, 证明这两个循环的效率相等.

解 由题 7.14.

$$\eta_{\text{iPa}} = 1 - \frac{\ln r_T}{r_T - 1}$$

由题 7.22, 因为 $r = r_T^{1/(k-1)}$, 所以,

$$\eta_{\text{iVa}} = 1 - \frac{k-1}{r_T-1} \ln r_T^{1/(k-1)} = 1 - \frac{\ln r_T}{r_T-1}$$

勒诺 (Lenoir) 循环; iPa 和 iVa 循环

7.29 某理想气体经历了下述循环: (i) 等容吸热, 压强从 P_1 升高到 P_2 ; (ii) 可逆绝热膨胀, 压强从 P_2 又回到 P_1 ; (iii) 等压压缩, 体积又回到循环的初始值. 分别在 $P-v$ 图及 $T-s$ 图上画出这个循环.

解 见图 7-12(a)、图 7-12(b), 与题 4.79 一致, 等容线比等压线陡.

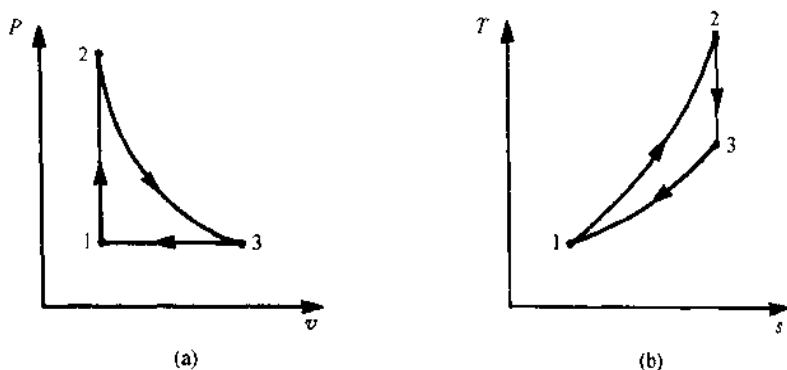


图 7-12

7.30 (a) 对于题 7.29 中的循环, 如果压缩比为 r , 等容吸热过程的升压比为 r_p , 列表表示各状态的状态参量 (压强 P , 体积 v , 温度 T); (b) 用定值比热及状态温度表示循环的效率.

解 (a) 见表 7-7. 注意: $r_p = P_2/P_1 = P_2/P_3 = (v_3/v_2)^k = r^k$.

(b) $q_h = c_v(T_2 - T_1)$, $q_c = c_p(T_3 - T_1)$, 因此,

$$\eta = 1 - \frac{q_c}{q_h} = 1 - k \frac{T_3 - T_1}{T_2 - T_1}$$

表 7-7

状态	P	v	T
1	P_1	v_1	T_1
2	$r_p P_1$	v_1	$r_f T_1$
3	P_1	$r v_1$	$r T_1$

7.31 为什么题 7.30(b)的结果不便于使用? 更有用的形式是什么?

解 如果在装有气体的汽缸内放入一个热电偶, 因为热电偶连结点具有一定的大小, 由此造成热惯性将影响读数, 所以不能得到 T_1 , T_2 和 T_3 精确值, 更有意义的表达式只包含压缩比:

$$\eta = 1 - k \frac{r - 1}{r^k}$$

7.32^D 某个勒诺空气循环中, 空气从 1bar, 300K 经过一等容(体积为常数)吸热过程后压强变为 5bar, 计算:(a)各状态参量;(b)循环热效率。

解 (a)由理想气体定律得 $v_1 = RT_1/P_1 = (0.28704)(300)/100 = 0.8611 \text{ m}^3$, 因而初始参数可以求出。体积相同, 压强为 5bar 时, 由理想气体方程得 $T_2 = T_1(P_2/P_1) = (300)(5/1) = 1500 \text{ K}$ 。绝热过程 2→3, 由 T - P 关系, 得

$$T_3 = T_2(P_3/P_2)^{(k-1)/k} = 1500(1/5)^{0.4/1.4} = 947 \text{ K}$$

因为

$$P_1 = P_3 = 1 \text{ bar}$$

所以

$$v_3 = v_1(T_3/T_1) = (0.8611)(947/300) = 2.718 \text{ m}^3$$

所有结果列在表 7-8 中。

表 7-8

状态	P/bar	$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	T/K
1	1	0.861	300
2	5	0.861	1500
3	1	2.718	947

(b) $r = v_3/v_1 = 2.718/0.8610 = 3.16$, 因而(由题 7.31)

$$\eta = 1 - [1.4(3.16 - 1)/(3.16^{1.4} - 1)] = 24.4\%$$

7.33^D 某勒诺空气循环中, 空气从 14.7psia, 80°F 经过等容吸热过程后压强升为 75psia, 计算:(a)各状态参量;(b)循环热效率。

解 (a)由理想气体定律得

$$v_1 = RT_1/P_1 = (53.35)(540)/(14.7 \times 144) = 13.605 \text{ ft}^3/\text{lb}_m = v_2$$

$$T_2 = T_1(P_2/P_1) = 540(75/14.7) = 2755^\circ \text{R}$$

$$T_3 = T_2(P_3/P_2)^{(k-1)/k} = (2755)(14.7/75)^{2/7} = 1729^\circ \text{R}$$

$$v_3 = v_1(T_3/T_1) = (13.605)(1729/540) = 43.56 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

(b)

$$r = v_3/v_1 = 43.56/13.605 = 3.20$$

因而(由题 7.31)

$$\eta = 1 - [1.4(3.20 - 1)/(3.20^{1.4} - 1)] = 24.9\%$$

7.34 利用图 7-12(a)的标记, 通过计算各个过程中的热交换、功以及内能的改变证明题 7.32 得到的结果。

解 1→2, ${}_1q_2 = q_h = c_v(T_2 - T_1) = (0.718)(1500 - 300) = 861.6 \text{ kJ/kg}$

在绝热过程 2→3 中没有热交换。

3→1, ${}_3q_1 = -q_c = c_v(T_1 - T_3) = (0.718)(300 - 947) = -650.2 \text{ kJ/kg}$

因此,

$$\oint q = 861.6 - 650.2 = 211.4 \text{ kJ/kg}$$

1→2,

$${}_1w_2 = -\int P dv = 0$$

2→3, 绝热, ${}_2w_3 = [R/(k-1)](T_3 - T_2) = (0.287/0.4)(947 - 1500) = -396.8 \text{ kJ/kg}$

3→1, 压强为 100 kPa 保持不变

$${}_3w_1 = -P\Delta v = -(100 \text{ kN/m}^2)[(0.861 - 2.718) \text{ m}^3/\text{kg}] = 185.7 \text{ kJ/kg}$$

因而 $\oint w = 396.8 + 185.7 = 211.1 \text{ kJ/kg}$

最后 $\eta = w_{\text{net}}/q_h = 211.1/861.6 = 24.5\%$

两者一致。

7.35 利用图 7-12(a) 中的标记, 通过计算各个过程中的热交换, 功及内能的增量证明题 7.33 得到的结果。

解 1→2, ${}_1q_2 = c_v(T_2 - T_1) = (0.171 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R})[(2755 - 549)^\circ\text{R}] = 379 \text{ Btu/lb}_m$

2→3, 没有热量传递, ${}_2u_3 = u_3 = {}_2w_3 = [R/(k-1)](T_3 - T_2)$
 $= [(0.06856 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R})/(1.4-1)][(41729 - 2755)^\circ\text{R}]$
 $= -176 \text{ Btu/lb}_m$

3→1, 压强保持 14.7 psia 不变,

$${}_3w_1 = -\int P dv = -P\Delta v = -(14.7 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2)[(13.605 - 43.56) \text{ ft}^3/\text{lb}_m]$$

$$= +63409 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m = 815 \text{ Btu/lb}_m$$

对应地, ${}_1u - u_3 = c_v(T_1 - T_3) = (0.171)(540 - 1729) = -203 \text{ Btu/lb}_m$

$${}_3q_1 = c_p(T_1 - T_3) = (0.240)(540 - 1729) = -285 \text{ Btu/lb}_m$$

7.36 如果空气是半理想气体, 计算题 7.32 中循环热效率。

解 对于 2→3 这个等熵膨胀过程,

$$P_3 = P_2(P_3/P_2) = (1063)(1/5) = 212.6$$

因此 $T_3 = 1000 + (10.7/43.4)50 = 1012.3 \text{ K}$

在这个温度下, $h_3 = 1047 + (12.3/50)57 = 1061 \text{ kJ/kg}$

因此 $q_c = |h_1 - h_3| = |300 - 1061| = 761 \text{ kJ/kg}$

对于 1→2 这个吸热过程,

$$q_h = u_2 - u_1 = 1209 - 214 = 995 \text{ kJ/kg}$$

热效率 $\eta = 1 - q_c/q_h = 1 - 761/995 = 23.5\%$

7.37 如果空气是半理想气体, 计算题 7.33 中循环的热效率。

解 等熵膨胀过程 2→3,

$$P_3 = P_2(P_3/P_2) = [1064.3 + (55/100)(172.0)](14.7/75) = 227.1$$

因而

$$T_3 = 1800 + [(227.1 - 201.9)/(250.6 - 201.9)](100) = 1852^\circ\text{R}$$

在这个温度下, $u_3 = 337.4 \text{ Btu/lb}_m$, 现在, 由第一定律得

$${}_3q_1 = -{}_3q_1 = {}_3w_1 + (u_3 - u_1) = R(T_3 - T_1) + (u_3 - u_1)$$

$$= (0.06856)(1852 - 540) + (337.4 - 92.1) = 335.2 \text{ Btu/lb}_m$$

且 $q_h = u_2 - u_1 = 532.4 - 92.1 = 440.3 \text{ Btu/lb}_m$

因此, $\eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (335.2/440.3) = 23.8\%$

7.38 某种热容比为 k 的理想气体完成了由下述三个过程构成的循环。这三个过程都可逆, 状态 1 到状态 2: 等温膨胀, 状态 1 的压强为 P_1 , 温度为 T_1 , 状态 2 的压强为 αP_1 , 状态 2 到状态 3: 绝热膨胀, 状态 3 的压强为 βP_1 , 状态 3 到状态 1: 此过程在 T - s 坐标上是一条直线。(a) 在 T - s 图上画出这个循环; (b) 证明状态 3 的温度 $T_3 = T_1(\beta/\alpha)^{(k-1)/k}$; (c) 分别计算这三个过程中热传递的大小和方向; (d) 证明循环效率

$$\eta = 1 - \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{(k-1)/k} \right]$$

解 (a) 理想气体的等温膨胀过程, $\Delta s = R \ln(P_1/P_2) > 0$, 因而过程 1→2 如图 7-13 所示。等熵膨胀, $Tv^{k-1} = \text{常数}$, 因而过程 2→3 如图所示。最后一个过程从 3 到 1 是一条直线。

(b) $T_3/T_1 = T_3/T_2 = (P_3/P_2)^{(k-1)/k} = (\beta/\alpha)^{(k-1)/k}$

$$\begin{aligned}
 (c) \quad 1 \rightarrow 2, \quad {}_1q_2 &= T_1 \Delta s = -RT_1 \ln \alpha > 0 \\
 \text{绝热过程,} \quad {}_2q_3 &= 0 \\
 3 \rightarrow 1, \quad {}_3q_1 &= \int_3^1 T ds = \bar{T}(s_1 - s_3) = \bar{T}(s_1 - s_2) \\
 &= -\frac{1}{2}(T_1 + T_3)R \ln \alpha < 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (d) \quad \eta &= 1 - (q_c/q_h) = 1 + ({}_3q_1/{}_1q_2) = 1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T_3}{T_1} \right) \\
 &= 1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T_3}{T_2} \right) = 1 - \frac{1}{2} \left[1 + \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{(k-1)/k} \right]
 \end{aligned}$$

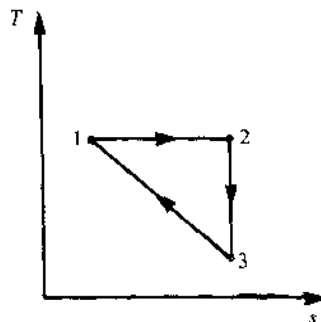


图 7-13

7.39 如果 $T_h = 1500\text{K}$, $T_c = 500\text{K}$, 试计算题 7.38 中描述的循环热效率。

解 由题 7.38(d), 得

$$\eta = 1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T_c}{T_h} \right) = 1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{500}{1500} \right) = \frac{1}{3}$$

7.40 如果 $T_h = 2540^\circ\text{F}$, $T_c = 340^\circ\text{F}$, 试计算题 7.38 描述的循环热效率。

解 由题 7.38(d), 得

$$\eta = 1 - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T_c}{T_h} \right) = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{800}{3000} \right) = 0.36$$

7.41 某种理想气体完成了由下述过程构成的可逆循环。(i) 从压强为 P_1 和温度为 T_1 的状态 1 经等温膨胀到压强为 αP_1 的状态 2; (ii) 等压压缩到温度为 βT_1 的状态 3; (iii) 经过一个等熵过程又回到系统的初始状态。(a) 分别在 P - v 图及 T - s 图上画出这个循环。(b) 证明循环效率为

$$\eta = 1 - \frac{k(\beta - 1)}{(k-1) \ln \alpha}$$

解 (a) 在 P - v 图上, 等熵线, $Pv^k = \text{常数}$, 而等温线, $Pv = \text{常数}$, 因为 $k > 1$, 所以等熵线比等温线陡, $1 \rightarrow 2$ 和 $3 \rightarrow 1$ 这两个过程曲线必须如图 7-14(a) 所示, 水平线表示过程 (ii), 因而循环如图所示。在 T - s 图上, $1 \rightarrow 2$ 等温膨胀, $\Delta s = -R \ln \alpha > 0$, 且 $\alpha < 1$, 对理想气体, 等压线沿东北-西南方向且接近于直线, 所以过程 (ii) 如图所示。 $3 \rightarrow 1$ 等熵过程是一条竖直向上的直线, 如图所示。

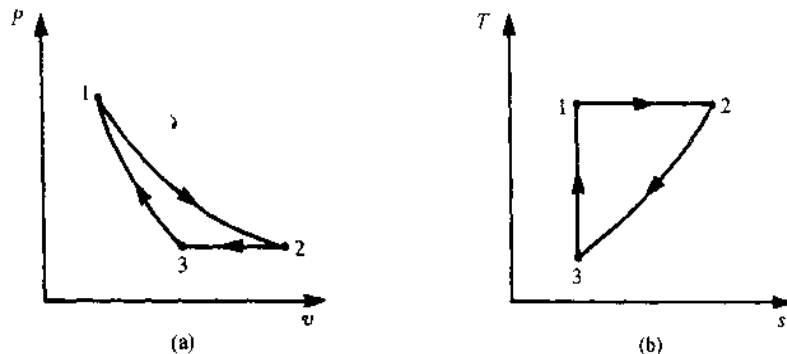


图 7-14

(b) 循环效率

$$\eta = 1 - q_c/q_h$$

由题 7.38(c), 得

$$q_h = -RT_1 \ln \alpha$$

且

$$q_c = -{}_2q_3 = c_p(T_2 - T_3) = c_p(T_1 - T_3) = c_p T_1(1 - \beta)$$

因而

$$\eta = 1 + \frac{c_p}{R} \frac{1 - \beta}{\ln \alpha} = 1 - \frac{k(\beta - 1)}{(k-1) \ln \alpha}$$

由收集的公式 $\beta = T_3/T_1 = (P_3/P_1)^{(k-1)/k} = (P_2/P_1)^{(k-1)/k} = \alpha^{(k-1)/k}$, 循环效率可直接用 T_h 和 T_c 表示为

$$\eta = 1 - \frac{\beta - 1}{\ln \beta} = 1 - \frac{T_h - T_c}{T_h \ln(T_h/T_c)}$$

- 7.42^D 2kg 空气由压强为 10bar, 温度为 1500K 的状态经等温膨胀后压强为 1bar, 然后经历一等压冷却过程, 最后经历一绝热压缩过程又回到初始状态. 计算: (a) 输出的净功 (kJ/cycle); (b) 热效率 (%).

解 (a) 利用图 7.41 的标记, 则 $T = T_h = 1500\text{K}$, $\alpha = \frac{1}{10}$, 可计算得

$$\beta = \alpha^{(\gamma-1)/\gamma} = (1/10)^{2/7} = 0.518$$

$$q_h = -RT_1 \ln \alpha = -(0.28704)(1500)(-\ln 10) = 991 \text{ kJ/kg}$$

$$q_c = c_p T_1 (1 - \beta) = (1.005)(1500)(0.482) = 727 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = m(q_h - q_c) = (2\text{kg})(264 \text{ kJ/kg}) = 528 \text{ kJ/cycle}$$

(b)

$$\eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (727/991) = 26.6\%$$

- 7.43^D 5 lb_m 空气由压强为 150psia, 温度为 3000°R 的状态经等温膨胀后压强为 15psia, 然后经历一个等压冷却过程, 最后经历一绝热压缩过程, 系统恢复到初始状态. 计算: (a) 输出的净功 (Btu/cycle); (b) 热效率 (%).

解 (a) 利用图 7.41 中的标记, 则 $T_1 = T_h = 3000^\circ\text{R}$, $\alpha = 1/10$, 可计算得

$$\beta = \alpha^{(\gamma-1)/\gamma} = (1/10)^{2/7} = 0.518$$

$$q_h = -RT_1 \ln \alpha = -(0.06856)(3000)(-\ln 10) = 473 \text{ Btu/lb}_m$$

$$q_c/c_p T_1 (1 - \beta) = (0.240)(3000)(0.482) = 347 \text{ Btu/lb}_m$$

$$w_{\text{net}} = m(q_h - q_c) = (5 \text{ lb}_m)(126 \text{ Btu/lb}_m) = 630 \text{ Btu/cycle}$$

(b)

$$\eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (347/473) = 26.6\%$$

- 7.44^D 如图 7-15, 可以看作理想气体的空气在状态 1 的参量为 (1bar, 300K), 经一等温压缩过程后体积变为原来的 1/5 (点 2), 然后有两种选择完成一个循环. 第一种选择是经等压吸热后达到状态 4, $v_4 = 0.2727 \text{ m}^3/\text{kg}$, $T_4 = 475.1 \text{ K}$, 最后经等熵膨胀后系统又回到状态 1. 第二种选择是经等容吸热后达到状态 3, 最后经等熵膨胀后系统又回到状态 1. 第二种选择所对应的循环效率增加了多少?

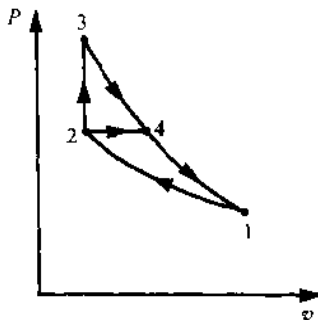


图 7-15

解 我们要比较 iPa 循环 1→2→4→1 与 iVa 循环 1→2→3→1 的效率. 由题 7.28 知, 两个效率相差

$$\eta_{\text{Va}} - \eta_{\text{Pa}} = \frac{\ln(T_4/T_1)}{(T_4/T_1) - 1} - \frac{\ln(T_3/T_1)}{(T_3/T_1) - 1} \quad (1)$$

代入数据,

$$T_4/T_1 = 475.1/300 = 1.584$$

由等熵过程 $T-v$ 关系,

$$T_3/T_1 = (v_1/v_3)^{\gamma-1} = 5^{0.4} = 1.904$$

因而

$$\eta_{\text{Va}} - \eta_{\text{Pa}} = \frac{\ln 1.584}{0.584} - \frac{\ln 1.904}{0.904} = 0.0752$$

这个值是 η_{Pa} 的 10.6%

- 7.45^D 通过计算两个循环中各阶段的 $q, w, \Delta u$ 以及这些量对整个循环的积分, 检验题 7.44.

解 前面(题 7.23 和表 7-5)已经分析过 iVa 循环.

iPa 循环对应的分析如表 7-9.

表 7-9

状态	$Q/(kJ/kg)$	$w/(kJ/kg)$	$\Delta u/(kJ/kg)$
1			
2	-138.6	138.6	0.0
4	176.0	-50.3	125.7
1	0.0	-125.7	-125.7
\oint	37.4	-37.4	0.0

7.46 如果空气是半理想气体,重解题 7.44.

解 在题 7.25 中已经完成了对 iVa 循环的计算,得 $\eta_{va}=0.290$. 题 7.17 讨论了 iPa 循环. 根据表 B2 内推,得

$$q_h = h_4 - h_2 = 477.7 - 300.2 = 177.5 \text{ kJ/kg}$$

且 $q_c = RT_1 \ln(v_1/v_2) = (0.28704)(300)(\ln 5) = 138.6 \text{ kJ/kg}$

则 $\eta_{Pa} = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (138.6/177.5) = 0.219$

$$\eta_{va} - \eta_{Pa} = 0.071$$

或 $\eta_{va} - \eta_{Pa} = 32.4\% \eta_{Pa}$

- 7.47^D 如图 7-15, 可以当作理想气体的空气由状态 1 (15 psia, 60°F) 等温压缩到体积为原体积的 1/4 (点 2), 然后有两种选择完成一个循环. 第一种选择是等容吸热到点 3, 温度为 1000°R, 最后经等熵膨胀后系统又回到状态 1. 第二种选择是经等压吸热达到状态 4, 最后经等熵膨胀后系统又回到状态 1. 第一种选择所对应的循环效率增量是多少?

解 利用题 7.44 中的式(1), 这时计算得

$$T_4/T_1 = (P_4/P_1)^{(k-1)/k} = (P_2/P_1)^{(k-1)/k} = (v_1/v_2)^{(k-1)/k} = 4^{2/7} = 1.486$$

$$T_3/T_1 = (v_1/v_2)^{k-1} = 4^{1.4} = 1.741$$

因而 $\eta_{va} - \eta_{Pa} = \frac{\ln 1.486}{0.486} - \frac{\ln 1.741}{0.741} = 0.0667$

即为 η_{Pa} 的 8.9%.

奥托 (Otto) 循环

- 7.48 分别画出奥托循环的 $P-V$ 图及 $T-S$ 图. 作为工质的空气在初始状态点 1 的参量等于大气的压强和温度. 用 $Q=0$ 标记可逆绝热 (等熵) 过程, 用 Q_h, Q_c 标记其他过程中的热传递.

解 如图 7-16.

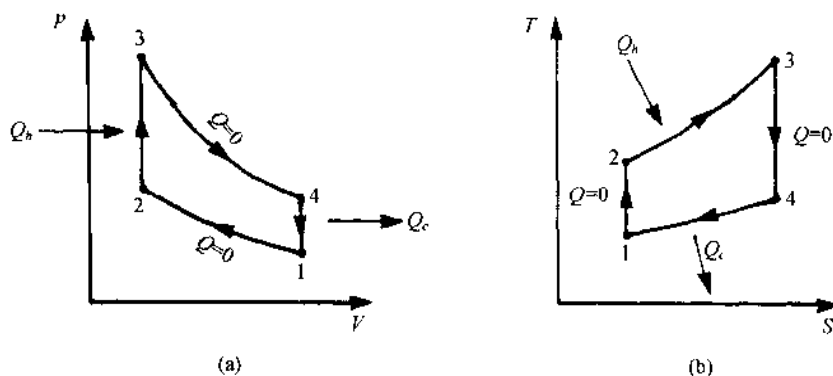


图 7-16

- 7.49 对题 7.48 中的循环, 计算: (a) 空气的最小体积; (b) 活塞排气体积; (c) 压缩比.

解 (a) 空气的最小体积 $= V_2 = V_3$;

(b) 活塞排气体积 $= V_1 - V_2 = V_4 - V_3$;

(c) 压缩比 $(r) = V_1/V_2 = V_4/V_3$.

- 7.50 对某标准冷空气奥托循环, 用状态 1 (图 7-16) 的条件列表表示各状态的压强、体积和温度.

解 如表 7-10. 注意此表中有一个参量 T_3 , T_3 是此循环中空气达到的温度最高值, 这个参量在题中经常出现, 比如循环中吸收的热量, $Q_h = mc_v(T_3 - T_2)$. 根据空气的初始温度及压缩比可以求得 T_2 , 循环中空气的质量可以作为已知量给出, 也可以求出 (也就是, 根据气缸的体积及空气的状态参

量求), Q_h 求出了, 则就可以求出 T_3 . 相反地, 已知 T_3 也可以求 Q_h .

表 7-10

状态	P	V	T
1	P_1	V_1	T_1
2	$r^k P_1$	$(1/r)V_1$	$r^{k-1} T_1$
3	$(r T_3/T_1) P_1$	$(1/r)V_1$	T_3
4	$(r^{1-k} T_3/T_1) P_1$	V_1	$r^{1-k} T_3$

- 7.51 空气视为理想气体, 分别用: (a) 压缩比和 (b) 等熵温度比, 表示奥托循环的效率; (c) 空气视为半理想气体, 用表中的参数表示奥托循环的效率.

解 (a) 由表 7-10, 有

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{m c_v (T_4 - T_1)}{m c_v (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{r^{1-k} T_3 - T_1}{T_3 - r^{k-1} T_1} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

(b) $r^{k-1} T_2/T_1 = T_3/T_4$, 所以, $\eta = 1 - (T_1/T_2) = 1 - (T_1/T_3)$.

(c) 吸热和放热时体积不变, 所以,

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{m(u_4 - u_1)}{m(u_3 - u_2)} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2}$$

- 7.52 利用图 7-16 中的标记证明: 某标准冷空气奥托循环中的温度 T_1 和 T_3 一定, 且 $r = (T_3/T_1)^{5/4}$ 时, 循环输出功最大, 同时, $T_2 = \sqrt{T_1 T_3}$. 并表示出此功与在 T_3 和 T_1 之间工作的卡诺热机输出功的比值, 此卡诺热机吸收的热量也为 Q_h .

解 由题 7.51(a), $W_{net} = \eta Q_h = (1 - r^{k-1}) m c_v (T_3 - r^{k-1} T_1)$, 则

$$W_{net}/m c_v = (1 - r^{k-1}) T_3 - (r^{k-1} - 1) T_1$$

对这个函数求导数, 导数为零时, $r = (T_3/T_1)^{1/(2k-2)} = (T_3/T_1)^{5/4}$. 由表 7-10 得

$$T_2 = r^{k/10} T_1 = (T_3/T_1)^{1/2} T_1 = (T_1/T_3)^{1/2}$$

且 Q_h 一定, 则

$$\frac{W_{net}}{W_{net}^*} = \frac{\eta}{\eta^*} = \frac{1 - r^{k/10}}{1 - T_1/T_3} = \frac{1 - (T_1/T_3)^{1/2}}{1 - (T_1/T_3)}$$

- 7.53 某奥托循环的工质是质量为 0.1 kg 的空气, 视为理想气体, 循环压缩比为 5/1, 燃烧过程放热 750 kJ/kg, 空气的初始状态为 1 bar, 300 K. 计算四个状态的参量: 压强 (bar)、体积 (m^3) 和温度 (K).

解 由理想气体定律得

$$V_1 = m R_a T_1 / M P_1 = (0.1)(0.08134)(300)/(28.97)(1) = 0.08610 m^3$$

接着由表 7-10, 有

$$V_2 = (1/r) V_1 = 0.0861/5 = 0.01722 m^3$$

$$T_2 = T_1 r^{k-1} = (300)(5^{0.4}) = 571.1 K$$

$$P_2 = P_1 r^k = (1)(5^{1.4}) = 9.518 \text{ bar}$$

由 $q_h = c_v (T_3 - T_2)$ 解得

$$750 = (0.718)(T_3 - 571.1)$$

$$T_3 = 1616 K$$

由表 7-10 可求出其他参数. 完整的结果如表 7-11.

表 7-11

状态	P/bar	V/m^3	T/K
1	1	0.08610	300
2	9.52	0.01722	571
3	26.93	0.01722	1616
4	2.83	0.08610	849

7.54 计算题 7.53 中每个过程中的热传递(kJ)、功(kJ)和内能的变化(kJ),并通过对整个循环积分验证这些结果.

解 过程 1→2 绝热,所以

$${}_1Q_2 = 0,$$

$${}_1W_2 = U_2 - U_1 = m c_v (T_2 - T_1) = (0.1)(0.718)(571.1 - 300) = -19.16 \text{ kJ}$$

2→3,

$${}_2W_3 = 0$$

$${}_2Q_3 = U_3 - U_2 = m c_v (T_3 - T_2) = (0.1)(0.718)(1615.7 - 571.1) = 75.0 \text{ kJ}$$

这和上题所给的数据一致.

3→4 的计算和 1→2 类似: ${}_3Q_4 = 0$

$${}_3W_4 = U_4 - U_3 = m c_v (T_4 - T_3) = (0.1)(0.718)(848.6 - 1615.7) = -55.1 \text{ kJ}$$

4→1,

$${}_4W_1 = 0$$

$${}_4Q_1 = U_1 - U_4 = m c_v (T_1 - T_4) = (0.1)(0.718)(300 - 848.6) = -39.4 \text{ kJ}$$

表 7-12 中列出了上述结果,并且证实了

$$\oint Q + \int W - \oint \Delta U = 0$$

表 7-12

状态	Q/kJ	W/kJ	ΔU /kJ
1	0	19.5	19.5
2	75.0	0	75.0
3	0	-55.1	-55.1
4	-39.4	0	-39.4
1			
\oint	35.6	-35.6	0.0

7.55 通过循环效率的计算检验表 7-12 中热传递的数值.

解 由表 7-12, $\eta = 1 - Q_4/Q_3 = 1 - 39.4/75.0 = 0.4747$. $r=5, k=1.4$ 时,理论值

$$\eta = 1 - r^{1-k} = 1 - 5^{-0.4} = 0.4747$$

7.56 如果将空气视为半理想气体,重解题 7.53.

解 等熵过程 1→2,由表 B2 得

$$V_{r2} = V_{r1} (V_2/V_1) = V_{r1}/r = 351.3/5 = 70.26$$

因而

$$T_2 = 550 + (4.95/15.43)50 = 566.0 \text{ K}$$

T_2 已知,则

$$P_2 = P_1 (P_2/P_1) = (1)(23.49/2.451) = 9.58 \text{ bar}$$

2→3,有

$${}_2x_3 = 0$$

$${}_2q_3 = 750 \text{ kJ/kg} = u_3 - u_2$$

温度为 T_2 时,

$$u_2 = 397.2 + (16.0150)(37.9) = 409.3 \text{ kJ/kg}$$

则

$$u_3 = 750 + 409.3 = 1159.3 \text{ kJ}$$

则

$$T_3 = 1400 + (44.3/47)50 = 1447 \text{ K}$$

由理想气体关系式 $P_3/P_2 = T_3/T_2$,得

$$P_3 = (9.58)(1447/566.0) = 24.5 \text{ bar}$$

3→4 的计算与 1→2 的计算类似,体积比相同, $V_{r4} = rV_{r3} = 5(4.550) = 22.75$. 因而

$$T_4 = 850 + (0.12/3.48)50 = 852 \text{ K}$$

$$P_4 = P_3 (P_4/P_3) = (24.5)(0.78/913.8) = 2.89 \text{ bar}$$

上述结果收集在表 7-13 的前三列中.

7.57 如果将空气视为半理想气体,重解题 7.56.

解 1→2,

$${}_1Q_2 = 0$$

$${}_1W_2 = m(u_2 - u_1) = (0.1)(409.3 - 214.1) = -19.5 \text{ kJ}$$

2→3,

$${}_2W_3 = 0$$

$${}_2Q_3 = (750 \text{ kJ/kg})(0.1 \text{ kg}) = 75.0 \text{ kJ}$$

$$U_3 = U_2 + {}_2Q_3 = 40.9 + 75.0 = 115.9 \text{ kJ}$$

$$3 \rightarrow 4, \quad {}_3Q_4 = 0$$

$${}_3W_4 = m(u_4 - u_3) = (0.1)(635.5 - 1159) = -52.3 \text{ kJ}$$

$$4 \rightarrow 1, \quad {}_4W_1 = 0$$

$${}_4Q_1 = m(u_1 - u_4) = (0.1)(214.1 - 635.5) = -42.1 \text{ kJ}$$

上述所有结果以及它们对循环的积分全部列在表 7-13 后三列中。

比较表 7-13 与表 7-11 和表 7-12 可以看出,它们在大约 10% 的范围内是基本一致的——这个差异比在示例过程中产生的实际误差要小。

表 7-13

状态	P , bar	V , m^3	T , K	Q , kJ	W , kJ	ΔU , kJ
1	1	0.08610	300	0	19.5	19.5
2	9.58	0.01722	566	75	0	75.0
3	24.5	0.01722	1447	0	52.3	-52.3
4	2.89	0.08610	852	-12.1	0	-42.1
1						
\oint				32.9	-32.8	0.1

- 7.58 某奥托循环的工质是空气(视为理想气体),初始参数为(15psia, 60°F),压缩比为 7.0, 每磅空气在燃烧过程中放出 1000Btu 的热量,计算:(a)循环中达到的最高压强和温度;(b)循环热效率;(c)每循环输出的净功(Btu/lb_m)。

解 (a)由表 7-10, $T_2 = r^{k-1} T_1 = (7^{0.4})(520) = 1133^\circ\text{R}$

由 $q_h = c_v(T_3 - T_2)$, 得 $1000 = (0.171)(T_3 - 1133)$, 则

$$T_3 = 6981^\circ\text{R}$$

因而,由表 7-10,得

$$P_3 = (rT_3/T_1)P_1 = (7)(6981/520)(15) = 1410 \text{ psia}$$

$$(b) \quad \eta = 1 - 1/r^{k-1} = 1 - 1/7^{0.4} = 0.5408$$

$$(c) \quad w_{net} = \eta q_h = (0.5408)(1000) = 541 \text{ Btu/lb}_m$$

- 7.59 如果空气视为半理想气体,能不能用空气表求解题 7.58.

解 不精确地讲,必须将表进行相当大的外推——从 4000°R 外推到大约 5400°R. 虽然内能的外推可以基本准确,但等熵过程中体积的减小却不可能精确,读者可以参考题 7.73 和题 7.98 找出求解这个问题的其他方法。

- 7.60 某汽车的循环中吸收的热量是放出热量的两倍,(a)热效率是多少(%)? (b)压缩比是多少? (c)在求解(b)时做了哪些假设?

$$\text{解 (a)} \quad \eta = 1 - Q_c/Q_h = 1 - 1/2 = 50\%$$

$$(b) \quad \eta = 1 - r^{1-k}$$

$$\text{则} \quad r = \left(\frac{1}{1-\eta} \right)^{1/(k-1)} = 2^{5.2} = 5.66$$

(c)空气视为理想气体,且 $k=1.4$.

- 7.61 奥托循环中四个基本状态的温度分别为 500, 1000, 2500 和 1250°R,若空气是理想气体,计算:(a)压缩比;(b)每循环吸收的热量(Btu/lb_m);(c)热效率(%).

$$\text{解 (a)由表 7-10,} \quad r = (T_2/T_1)^{1/(k-1)} = 2^{5.2} = 5.66$$

$$(b) \quad q_h = c_v(T_3 - T_2) = (0.171)(2500 - 1000) = 256.5 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(c) \quad \eta = 1 - (T_1/T_2) = 1 - (1/2) = 50\%$$

- 7.62 空气视为半理想气体,重解题 7.61.

解 (a)等熵压缩,

$$r = V_1/V_2 = V_{r1}/V_{r2} = 426.8/73.45 = 5.811$$

$$(b) \quad q_h = u_3 - u_2 = 475.2 - 172.6 = 302.6 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(c) \quad \eta = 1 - q_c/q_h = 1 - (u_1 - u_4)/(u_3 - u_2) \\ = 1 - (218.7 - 85.2)/(475.2 - 172.6) = 55.9\%$$

7.63 某标准空气的奥托循环(图 7-16)。已知: $T_1 = 300\text{K}$, $T_2 = 600\text{K}$, $T_3 = 1950\text{K}$, 通过计算 ${}_1w_2$, ${}_2q_3$, ${}_3w_4$ 及 r , 对这个循环做一个最简单的分析, 假设空气可视为理想气体。

$$\text{解} \quad {}_1w_2 = c_v(T_2 - T_1) = (0.718)(600 - 300) = 215.4 \text{ kJ/kg} \\ {}_2q_3 = c_v(T_3 - T_2) = (0.718)(1950 - 600) = 969.3 \text{ kJ/kg}$$

由表 7-10, 得

$${}_3w_4 = c_v(T_4 - T_3) = c_v T_3 [(T_1/T_2) - 1] = (0.718)(1950)(-1/2) = -700 \text{ kJ/kg} \\ r = (T_2/T_1)^{1/(k-1)} = 2^{5/2} = 5.66$$

7.64 如果空气为半理想气体, 重解题 7.63。

$$\text{解} \quad \text{由表 B2,} \quad {}_1w_2 = u_2 - u_1 = 435.1 - 214.1 = 221.0 \text{ kJ/kg} \\ {}_2q_3 = u_3 - u_2 = 1654 - 435 = 1219 \text{ kJ/kg}$$

在等熵过程 3→4 中,

$$v_4/v_3 = V_{r4}/V_{r3}$$

但

$$r = v_4/v_3 = v_1/v_2 = V_{r1}/V_{r2} = 351.3/59.78 = 5.877$$

因而

$$V_{r4} = (5.877)(1.712) = 10.06$$

$$T_4 = 1100 + (0.62/1.35)(50) = 1123\text{K}$$

则

$${}_3w_4 = u_4 - u_3 = 866.4 - 1654 = -788 \text{ kJ/kg}$$

[题中温度较高时, 利用空气表得出的结果与利用定值比热得出的结果明显不同。]

7.65 某奥托循环吸入的空气(理想气体)状态参量为 15psia, 60°F, 压缩比为 8:1, 每循环中空气吸收的热量为 800Btu/lb_m, 为了使循环净功增加 20%, 那么体积压缩比必须增加到多少?

$$\text{解} \quad \text{对于初始循环,} \quad \eta = 1 - (1/r^{k-1}) = 1 - (1/8^{0.4}) = 0.5647 \\ w_{\text{net}} = \eta q_h = (0.5647)(800) = 451.8 \text{ Btu/lb}_m$$

对于新的循环,

$$w_{\text{net}} = (1.20)(451.8) = 542.1 \text{ Btu/lb}_m$$

则

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = 542.1/800 = 0.6776$$

但

$$\eta = 1 - 1/r^{k-1}$$

所以新的压缩比为 $r = (1 - \eta)^{1/(1-k)} = (0.3224)^{-5/2} = 16.95$, 即 17:1。

注意, 压缩比有很大的提高, 必定使得输出净功有很大的提高。但压强太高又使得这个奥托循环难以实现。

7.66 某奥托循环中空气的曲线变化过程遵循多方过程: $Pv^{1.2} = \text{常数}$ 。如果压缩比为 8:1, 每循环的净功为 185.2Btu/lb_m 空气, 压缩冲程开始时空气的压强为 15psia, 温度为 600°R, 计算循环中空气达到的最高温度(°R)。

解 对于一个多方过程有公式 $w = [R/(n-1)]\Delta T$, 根据图 7-16 中的标号, 得

$$185.2 \text{ Btu/lb}_m = w_{\text{net}} = (0.06856 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) \left(\frac{1}{1.2-1} \right) \times \{ (T_3 - T_4) - (T_2 - T_1) \}$$

则

$$T_3 - T_4 - T_2 + T_1 = 540.4^\circ\text{R}$$

因为 1→2,

$$T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1} = 8^{0.2} = 1.5157$$

3→4,

$$T_3/T_4 = (v_4/v_3)^{n-1} = 8^{0.2} = 1.5157$$

所以代入后得

$$1.5157T_4 - T_4 - 1.5157T_2 + T_1 = 540.4$$

则

$$T_4 - T_1 = 1047.9$$

$$T_4 = 1047.9 + T_1 = 1647.9^\circ\text{R}$$

所求最高温度为

$$T_1 = 1.5157T_4 = 2500^\circ\text{R}$$

7.67^D 表 7-14 为一奥托循环的有关数据, 如果你在此循环中引入布雷顿(Brayton)循环中的回热器, 那么这也许会导致新的发现。在奥托循环中引入了回热器会使每千克空气

循环中的净功(kJ/kg)以及吸收的热量(kJ/kg)发生什么变化? 设回热器的效率为75%。

解 在布雷顿循环中,回热器是在涡轮汽轮机后用来利用其他方面的废能的(看题 7.155),从逻辑上看,在奥托循环中利用回热器的地方应该是在状态 4,这里空气膨胀后的温度仍为 849K,空气压缩后(状态 2),温度为 571K,比状态 4 的温度低 278K. 利用回热器可以节省的最多能量是(如果由于温度降低 278K 而获得的能量都可利用的话)

$$(0.718)(278) = 199.6 \text{ kJ/kg}$$

如果回热器的有效率为 75%,可能节省的能量为 $(0.75)(199.6) = 149.7 \text{ kJ/kg}$.

回热器内的温度将会降低 $q/c_v = 149.7/0.718 = 208.5 \text{ K}$

因此出口处的空气温度为 $849 - 209 = 640 \text{ K}$

则 $q_c = (0.718)(640 - 300) = 244 \text{ kJ/kg}$

现在空气由温度为 $571 + 150 = 721 \text{ K}$ 加热升高到 1616 K ,需要的热量在数值上等于

$$(0.718)(1616 - 721) = 642.6 \text{ kJ/kg}$$

以前需要的热量为 $(0.718)(1616 - 571) = 750.3 \text{ kJ/kg}$

因而 $\Delta q = 750.3 - 642.6 \approx 108 \text{ kJ/kg}$

以上面描述的方式利用回热器并没有改变循环中产生的机械功,但使循环中吸入的热量减少了。

表 7-14

状态	P/bar	$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	T/K
1	1	0.8611	300
2	9.52	0.1722	571
3	26.94	0.1722	1616
4	2.83	0.8611	849

7.68 将题 7.65 中考虑的原始奥托循环的各个状态的压强(psia),比体积(ft^3/lb_m)和温度($^{\circ}\text{R}$)编制成一个表。

解 根据表 7-10(用 v 代替 V),已知 P_1, T_1, r 和 q_h ,求得 v_1 为 RT_1/P_1 ,根据 $q_h = c_v(T_3 - T_2) = c_v(T_3 - r^{k-1}T_1)$ 可求得 T_3 . 这样可得表 7-15.

表 7-15

状态	P, psia	$v/(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	T/ $^{\circ}\text{R}$
1	15	12.84	520
2	276	1.605	1195
3	1356	1.505	5873
4	74	12.84	2556

7.69 在题 7.65 和 7.68 的奥托循环中插入一个有效率为 45% 的回热器,此回热器的位置在空气发生绝热膨胀后,循环的热效率改变多少(%)?

解 回热器从出口处温度为 2556°R 的空气中吸取能量,并利用它加热压缩温度为 1195°R ——不是 1361°R 的空气. 所有的回热器都可看作是一个理想等容装置,所以节省的热量理想值为

$$c_v \Delta T = (0.171)(1361) = 232.7 \text{ Btu/lb}_m$$

如果回热器的有效率为 45%,实际的热传递量为 $(0.45)(232.7) = 104.7 \text{ Btu/lb}_m$.

其余需要在燃烧中吸收的能量为

$$800 - 104.7 = 695.3 \text{ Btu/lb}_m$$

现在,由题 7.65, $w_{\text{net}} = 451.8 \text{ Btu/lb}_m$ [插入回热器不影响输出净功]. 因而

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = 451.8/695.3 = 0.6498$$

原效率(题 7.65)为 0.5647,改变的百分率为 $[(0.6498 - 0.5647)/0.5647](100\%) = 15\%$.

7.70 假如有一台理论效率为 50% 的汽车发动机,由于各种损失,发动机的实际输出功只有理论值的 90%. 如果空气是理想气体,那么压缩比必须为多少?

解 实际输出功 $W_{\text{net}} = (0.90)(0.50)Q_h$, 所以实际效率 $\eta = (0.90)(0.50) = 0.45$, 因而

$$r = (1 - \eta)^{1/\gamma} = (0.55)^{1/2} = 4.16$$

- 7.71 一汽车用户手册中写道:吸入的空气状态参量为 1bar 和 300K, 压缩比为 5:1, 燃料给每千克空气释放的热量为 500kJ, 其他东西没有告诉你, 只在页边的空白处潦草地书写了在压缩和膨胀过程的实际效率为等熵过程的 90%。(a)这辆汽车的实际效率是多少?(b)输出净功是否也减少 10%? 假设空气是理想气体。

解 (a)由图 7-16, 利用可逆绝热关系, 得

$$T_{2s} = T_1 (v_1/v_2)^{\gamma-1} = (300)(5^{0.4}) = 571.1 \text{ K}$$

所以等熵压缩功为 $w_{12s} = c_v(T_{2s} - T_1) = (0.718)(571.1 - 300) = 194.6 \text{ kJ/kg}$

实际压缩功为 $w_{12a} = 194.6/0.9 = 216.2 \text{ kJ/kg}$

由此得 $T_{2a} = T_1 + (w_{12a}/c_v) = 300 + (216.2/0.718) = 601.1 \text{ K}$

继续求 T_{3a} 和 T_{4a} , 已知 $q_h = 500 \text{ kJ/kg}$, 所以

$$T_{3a} = T_{2a} + (q_h/c_v) = 601.1 + (500/0.718) = 1297.5 \text{ K}$$

T_{2a} 可由 T_1 以及实际压缩功求出, 同理 T_{4a} 可由 T_{3a} 以及实际膨胀功求出, 结果为 $T_{4a} = 743.2 \text{ K}$ 。

现在可以计算出实际热效率为

$$\eta = 1 - (T_{4a} - T_1)/(T_{3a} - T_{2a}) = 1 - (743.2 - 300)/(1297.5 - 601.1) = 0.3636$$

$$(b) \quad \frac{(w_{\text{net}})_a}{(w_{\text{net}})_r} = \frac{\eta_a}{\eta_r} = \frac{0.3636}{1 - 5^{-2/5}} = 0.766$$

这就意味着这台发动机的实际输出功只有用户手册所说的 76.6%。

- 7.72 如果空气是半理想气体, 重解题 7.71。

解 (a)根据图 7-16,

1→2, 为等熵压缩过程, $V_2 = V_1 (v_2/v_1) = (1/r)V_1 = 351.3/5 = 70.26$

因此 $T_{2s} = 550 + [(75.21 - 70.26)/(75.21 - 59.78)](50) = 566.0 \text{ K}$

此时 $u_{2s} = 409.3 \text{ kJ/kg}$

等熵压缩功为 ${}_1w_{2s} = u_2 - u_1 = 409.3 - 214.1 = 195.2 \text{ kJ/kg}$

压缩效率为 90%, 则 ${}_1w_{12a} = 195.2/0.90 = 216.9 \text{ kJ/kg}$

因而 $u_{2a} = u_1 + {}_1w_{12a} = 214.1 + 216.9 = 431.0 \text{ kJ/kg}$

如果燃烧给每 kg 空气加入的能量为 500kJ, 则 $u_3 = 431.0 + 500 = 931.0 \text{ kJ/kg}$

点 3 的温度

$$T_3 = 1150 + [(931.0 - 890.0)/(933.5 - 890.0)](50) = 1197.1 \text{ K}$$

$$V_{r3} = 9.33 + (47.1150)(1 - 1.14) = 8.26$$

膨胀后

$$V_{r4} = V_{r3} (v_4/v_3) = v_{r3}(r) = 5(8.26) = 41.3$$

因此

$$T_{4s} = 650 + [(41.3 - 48.24)/(39.41 - 48.24)](50) = 689.1 \text{ K}$$

这个温度下的

$$u_{4s} = 473.8 + (39.1/50)(39.1) = 504.4 \text{ kJ/kg}$$

则等熵膨胀功为

$$w_{34s} = u_3 - u_4 = -426.6 \text{ kJ/kg}$$

因此

$$w_{34a} = (0.90)(-426.6) = -383.9 \text{ kJ/kg}$$

$$u_{4a} = 931.0 + (-383.9) = 547.1 \text{ kJ/kg}$$

则

$$\eta = 1 - \frac{u_{4a} - u_1}{q_h} = 1 - \frac{547.1 - 214.1}{500} = 0.334$$

(b)对等熵情况来说, $u_1 = 214.1 \text{ kJ/kg}$, $u_2 = 409.3 \text{ kJ/kg}$, $u_3 = u_2 + q_h = 409.3 + 500 = 909.3 \text{ kJ/kg}$ 。

在这一点温度

$$T_3 = 1150 + [(909.3 - 890.0)/(933.5 - 890.0)](50) = 1172.2 \text{ K}$$

$$V_{r3} = 9.33 + (22.2/50) = 8.82$$

点 4, $V_{r4} = 5(8.82) = 44.1$, 因而

$$T_4 = 650 + (48.24 - 44.1)/(48.24 - 39.41)(50) = 673.4 \text{ K}$$

$$u_4 = 473.8 + (23.4/50)(39.1) = 492.1 \text{ kJ/kg}$$

因此,

$$\eta = 1 - \frac{u_2 - u_1}{q_h} = 1 - \frac{492.1 - 214.1}{500} = 0.444$$

以及

$$(w_{\text{net}})_2 / (w_{\text{net}})_1 = \eta / \eta_1 = 0.334 / 0.444 = 0.752$$

7.73 检查利用空气表解题 7.65 的可行性.

解 利用图 7-16 的标号, 1→2, 有

$$V_{r2} = V_{r1}(v_2/v_1) = (1/r)V_{r1} = (1/8)(387.5) = 48.44$$

因而

$$T_{2r} = 1100 + (57.63 - 48.44)/(57.63 - 45.61)(100) = 1176^\circ\text{R}$$

在此温度时

$$u_2 = 190.8 + (76/100) \times (18.5) = 204.9 \text{ Btu/lb}_m$$

现在, 在点 3,

$$u_3 = u_2 + q_h = 204.9 + 800.0 = 1004.9 \text{ Btu/lb}_m$$

温度大约为 4000°R, 这时空气要发生大量离解, 虽然求内能可以近似用线性外推法, 但体积的减少值是非线性的.

要说明这种解题方法, 必须用较高的温度值. 与 1004.9 Btu/lb_m 的内能对应的温度大约为 4805°R, 此时 $V_{r3} \approx 0.589$, 则 $V_{r4} = rV_{r3} = 8(0.589) = 4.708$, 因而

$$T_4 = 2600 + (0.0041/0.699)(100) = 2606^\circ\text{R}$$

$$u_4 = 497.5 + (6/100)(22.4) = 498.8 \text{ Btu/lb}_m$$

因为 u_1 已知, 则有

$$w_{\text{net}} = q_h - (u_4 - u_1) = 800 - (498.8 - 88.6) = 389.8 \text{ Btu/lb}_m$$

因为 q_h 和 u_1 固定, 则 $(\Delta w_{\text{net}})/w_{\text{net}} = -(\Delta u_4)/389.8$. 所以, 净功增加 20% 则必须

$$0.20 = -(\Delta u_4)/389.8 \quad \text{或} \quad \Delta u_4 = -77.96$$

或

$$u_4 = 498.8 - 77.96 = 420.8 \text{ Btu/lb}_m$$

这就是和新的数值对应的结果.

我们的问题是要多次尝试, 根据表格求解同时满足下列等式的解.

$$T_1 = 2200 + [(420.8 - 410.0)/(431.5 - 410.0)](100) = 2250^\circ\text{R}$$

$$V_{r4} = 7.235$$

而

$$r = V_{r1}/V_{r2} = V_{r1}/V_{r3}$$

$$387.5/V_{r2} = 7.235/V_{r4}$$

$$u_3 - u_2 = 800 \text{ Btu/lb}_m$$

因为 4805°R 的温度已超出表格中的最高温度, 这里我们不再做进一步的外推.

狄塞尔 (Diesel) 循环

7.74 (a) 分别在 $P-V$ 图及 $T-S$ 图上画出狄塞尔循环; (b) 假设工质为理想气体, 列表表示各状态压强、体积和温度作为初始状态及其他参数的函数.

解 (a) 如图 7-17.

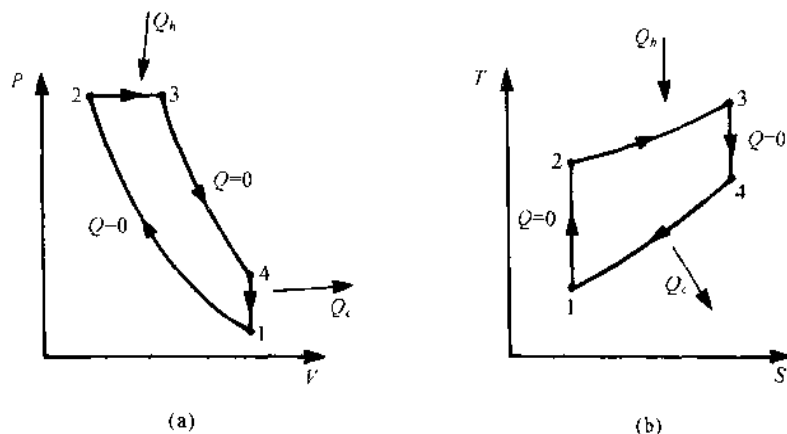


图 7-17

1(压强为大气压强)→2 过程,空气等熵压缩;压缩比 $r = V_1/V_2$,比奥托循环中的压缩比大得多。在点 2,液体燃料即刻喷入到热的压缩空气中,直到燃料完全燃烧(在点 3),燃烧过程中压强可视为常数。由膨胀比 $r_c = V_3/V_2$ 可以测出所需燃料的总量。与奥托循环的处理一样,用从外界热源吸热 Q_c 代替燃烧过程。3→4,是一个进一步的膨胀过程,此过程是一个(可行的)可逆绝热过程,因而是等熵过程。在点 4,空气压强仍然比大气压强高,此时活塞已经不能再移动了,空气等容放热。在分析时,我们用等容放热 Q_c 代替系统的实际排气过程。

表 7-16

状态	P	V	T
1	P_1	V_1	T_1
2	$r^k P_1$	$(1/r)V_1$	$r^{k-1} T_1$
3	$r^k P_1$	$(r/r_c)V_1$	$r_c r^{k-1} T_1$
4	$r_c^k P_1$	V_1	$r_c^k T_1$

(b)根据理想气体关系及 r 和 r_c 的定义可以建立表 7-16。注意和奥托循环不一样,

$$V_4/V_3 = (1/r_c)(V_1/V_2)$$

7.75 假如工质分别为(a)半理想或更一般气体;(b)理想气体,推出狄塞尔循环热效率公式。

解 (a)因为 q_h 为等压过程中吸收的热量, q_c 为等容过程中放出的热量,所以

$$\eta = 1 - \frac{q_c}{q_h} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2} \quad (1)$$

(b)对理想气体来说, $\Delta u = c_v \Delta T$, $\Delta h = c_p \Delta T$,并利用表 7-16 中的关系,由式(1)得

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{k} \frac{r_c^k - 1}{r^{k-1}(r_c - 1)} \quad (2)$$

7.76 某狄塞尔发动机吸入的空气状态为 1bar 和 300K,压缩比为 16:1,燃料完全燃烧后温度达 2000K,计算循环热效率以及每循环净功(kJ/kg 空气),假定空气为理想气体。

解 看图 7-17,由表 7-16,得

$$T_2 = T_1 r^{k-1} = 300(16^{0.4}) = 909\text{K}, T_3 = 2000\text{K}(\text{已知})$$

则

$$q_h = c_p(T_3 - T_2) = (1.005)(2000 - 909) = 1096\text{kJ/kg}$$

$$r_c = T_3/T_2 = 2000/909 = 2.20$$

由题 7.76 中的公式(2),得

$$\eta = 1 - \frac{1}{1.4} \frac{2 \cdot 20^{0.4} - 1}{16^{0.4}(2.20 - 1)} = 0.6041$$

以及

$$w_{\text{net}} = \eta q_h = (0.6041)(1096) = 662\text{kJ/kg}$$

7.77 利用空气表重解题 7.76。

解 因为 1→2 是等熵过程, $V_2 = (1/r)V_1 = (1/16)/(351.3) = 21.96$,所以

$$T_2 \approx 850 + (0.91/3.48)(50) = 863\text{K}$$

$$h_2 = 877.8 + (13.1/50)(55.7) = 892.4\text{kJ/kg}$$

在点 3,

$$h_3 = 2280\text{kJ/kg}$$

因此

$$q_h = h_3 - h_2 = 2280 - 892 = 1388\text{kJ/kg}$$

且

$$r_c = T_3/T_2 = 2000/863 = 2.317$$

3→4,

$$V_4 = V_3(r/r_c) = (1.573)(16/2.317) = 10.86$$

$$T_4 = 1050 + (1.43/1.61)(50) = 1094\text{K}$$

$$u_4 = 802.6 + (44.4/50)(43.7) = 841\text{kJ/kg}$$

因而,根据题 7.75 中的式(1),得

$$\eta = 1 - \frac{841.4 - 214.1}{2280 - 892} = 0.5480$$

以及 $w_{\text{net}} = \eta q_h = (0.5481)(1388) = 761\text{kJ/kg}$ [在温度比较高的情况下,利用空气表得出的结果与利用定值比热得出的结果不一样]。

7.78 通过计算循环中各状态点的压强、体积和温度以及热量的传递、功和内能的变化完成对题 7.76 的分析,并通过对有关量的循环积分证明你的结果。

解 看表 7-17。前三列中的部分量已经在题 7.76 中计算出,其他量可以根据理想气体定律(对于 v_1)以及表 7-16 求出,最后三列中的量可以根据常用公式求出,在题 7.76 中已经求得 $q_3 = -q_4$ 。

表 7-17

状态	P/bar	$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	T/K	$q/(\text{kJ}/\text{kg})$	$w/(\text{kJ}/\text{kg})$	$\Delta u/(\text{kJ}/\text{kg})$
1	1	0.8611	300	0	437	437
2	48.50	0.0538	909	1096	-312	783
3	48.50	0.1183	2000	0	-787	-787
4	3.01	0.8611	904	-434	0	-434
\oint				662	-662	-1

7.79 某狄塞尔发动机吸入空气的条件为 15psia 和 500°R,压缩比为 15:1,燃烧后温度达 4000°R。假如空气为理想气体,计算:(a)热效率;(b)每循环净功(Btu/lb_m)。

解 (a)由表 7-16,

$$T_2 = T_1 r^{k-1} = (500)(15^{0.4}) = 1477^\circ\text{R}$$

$$r_c = T_3/T_2 = 4000/1477 = 2.708$$

因而
$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{r_c^k - 1}{r_c - 1} = 1 - \frac{1}{1.4} \frac{2.708^{1.4} - 1}{(15^{0.4})(1.708)} = 0.570$$

(b)
$$q_h = c_p(T_3 - T_2) = (0.240)(4000 - 1477) = 605.5 \text{ Btu/lb}_m$$

而
$$w_{\text{net}} = \eta q_h = (0.570)(605.5) = 345.1 \text{ Btu/lb}_m$$

7.80 如果空气为半理想气体,重解题 7.79。

解 (a)在等熵过程 1→2 中, $V_2 = (1/r)V_1 = (1/15)(426.8) = 28.45$, 则

$$T_2 = 1400 + [(29.53 - 28.45)/(29.53 - 24.20)](100) = 1420^\circ\text{R}$$

在此温度时,

$$h_2 = 343.1 + (20/100)(26.4) = 348.4 \text{ Btu/lb}_m$$

在循环中达到最高温度(4000°R= T_3)时, $h_3 = 1108.7 \text{ Btu/lb}_m$ 且 $r_c = T_3/T_2 = 4000/1420 = 2.817$, 因此

$$q_h = h_3 - h_2 = 1108.7 - 348.4 = 760.3 \text{ Btu/lb}_m$$

3→4,
$$V_4 = (r/r_c)V_3 = (15/2.817)(1.121) = 5.969$$

$$T_4 = 2300 + [(6.728 - 5.969)/(6.728 - 5.898)](100) = 2391^\circ\text{R}$$

$$u_4 = 431.5 + (91/100)(21.7) = 451.2 \text{ Btu/lb}_m$$

因而
$$q_c = u_4 - u_1 = 451.2 - 85.2 = 366 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (366/760.3) = 0.5186$$

(b)
$$w_{\text{net}} = q_h - q_c = 760.3 - 366 = 394 \text{ Btu/lb}_m$$

7.81 通过计算循环中各过程的热量传递,功以及内能的变化完成题 7.80,并通过对有关量的循环求和证明你的结果。

解 根据第一定律,可以得到表 7-18。

表 7-18

状态	$q/(\text{Btu}/\text{lb}_m)$	$w/(\text{Btu}/\text{lb}_m)$	$\Delta u/(\text{Btu}/\text{lb}_m)$
1	0	165.9	165.9
2	760.3	-177.6	582.7
3	0	-382.6	-382.6
4	-366.0	0.0	-366.0
\oint	394.3	-394.3	0.0

7.82 表 7-19 保存了某学生的笔记中能读出的部分。(a)填补空白;(b)每千克空气循环中燃料燃烧放出的热量是多少(kJ/kg)?(c)热效率是多少(%)?假设空气为理想气体。

表 7-19 狄塞尔循环

	P/bar	$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	T/K
入口处(1)	0.9	1.000	313
压缩后(2)	—	0.0625	—
燃烧后(3)	—	0.111	—
膨胀后(4)	—	1.000	—

解 (a)由表 7-16, 因为

$$r = 1.000/0.0625 = 16, \quad r_c = 0.111/0.0625 = 1.776$$

所以

$$P_2 = P_3 = 43.7\text{bar}, \quad P_4 = 2.01\text{bar}$$

$$T_2 = 949\text{K}, \quad T_3 = 1685\text{K}, \quad T_4 = 699\text{K}$$

$$(b) \quad q_h = c_p(T_3 - T_2) = (1.005)(1685 - 949) = 740\text{kJ/kg}$$

$$(c) \quad \eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{1}{1.4} \frac{699 - 313}{1685 - 949} = 62.6\%$$

7.83 如果空气为半理想的气体,重解题 7.82。

解 根据图 7-17, 1→2 过程,

$$V_{r2} = (1/r)V_{r1} = (1/16)(317.2) = 19.83$$

$$\text{因而} \quad T_2 = 850 + [(22.87 - 19.83)/(22.87 - 19.39)](50) = 893.7\text{K}$$

$$P_2 = 106.69 + (43.7/50)(26.56) = 129.90,$$

则

$$P_2 = P_1(P_2/P_1) = (0.9)(129.90/2.885) = 40.5\text{bar}$$

在等压线上,

$$T_3 = r_c T_2 = (1.776)(893.7) = 1587\text{K}$$

$$\text{在绝热膨胀过程中,} \quad V_{r3} = (v_3/v_2)V_{r2} = (1.000/0.111)(3.380) = 30.42$$

$$\text{而} \quad T_1 = 750 + [(32.56 - 30.42)/(32.56 - 27.11)](50) = 770\text{K}$$

且

$$P_4 = P_3(P_4/P_3) = (40.5)(73.36/1351) = 2.20\text{bar}$$

[由表 B2 得 $P_{r1} = 66.11 + (19.7/50)(18.40) = 73.36$, $P_{r3} = 1220 + (37/50)177 = 1351$]. 因此,

$$q_h = h_3 - h_2 = [1702 + (37/50)(63)] - [878 + (43.7/50)(55.7)] = 822\text{kJ/kg}$$

$$q_c = u_4 - u_1 = [552.5 + (20/50)(40.4)] - [214.1 + (13/20)(14.4)] = 345.2\text{kJ/kg}$$

以及

$$\eta = 1 - (345.2/822) = 58.0\%$$

7.84 某狄塞尔循环中的理想空气在 1bar, 300K 和 40bar, 1400K 之间工作, 尽可能直接地计算循环热效率。

解 由表 7-16 知, $r = P_3/P_1 = 40$, $r_c = T_3/T_1 = 14/3$.

因而 $r = 40^{1.4} = 13.942$, $r_c = 60r/7 = 1.6266$,

$$\eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{r_c^k - 1}{r^{k-1}(r_c - 1)} = 1 - \frac{1}{1.4} \frac{1.976 - 1}{2.869(1.6266 - 1)} = 61.2\%$$

7.85 某狄塞尔循环中的半理想空气在 15psia, 500°R 和 500psia, 2500°R 之间工作, 尽可能直接地计算循环热效率。

解 在等熵压缩过程(看图 7-17)中,

$$P_{r2} = P_{r1}(P_2/P_1) = P_{r1}(P_3/P_1) = (1.868)(500/15) = 62.27$$

而

$$T_{2s} = 1300 + [(62.27 - 56.80)/(75.59 - 56.80)](100) = 1329^\circ\text{R}$$

因而在燃烧过程中放出的热量为

$$q_h = h(2500^\circ\text{R}) - h(1329^\circ\text{R}) = 646.6 - 324.7 = 321.9\text{Btu/lb}_m$$

且根据温度内插,

$$V_{r2} = 36.50 + (29/100)(-6.970) = 34.48$$

则

$$V_{r1} = 426.8$$

所以,

$$r = v_1/v_2 = 426.8/34.48 = 12.38$$

因为

$$r_1 = v_3/v_2 = T_3/T_2 = 2500/1329 = 1.881$$

$$V_{c1} = 5.180 \text{ (在 } 2500^\circ\text{R 时)}$$

所以

$$V_{c1} = (r/r_1)V_{c3} = (12.38/1.881)(5.180) = 34.08$$

由此得

$$T_1 = 1300 + [(34.08 - 36.50)/(29.53 - 26.50)](100) = 1335^\circ\text{R}$$

且

$$u_1 = 228.1 + (35/100)(19.1) = 234.8 \text{ kJ/kg}$$

现在我们可写出

$$q_h = u_3 - u_1 = 234.8 - 85.2 = 149.6 \text{ Btu/lb}_m$$

且

$$\eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (149.6/321.9) = 53.5\%$$

- 7.86^D 假如你继承了一辆压缩比为 5:1 的汽车,但你大学还没有毕业,为了节省钱你让它用柴油运行.可是你忘了安置排气装置,实际上排气时仍有燃料喷入.如果初时温度为 300K, (a) 在 $P-v$ 图上画出这个循环; (b) 这台发动机产生的净功是多少(kJ/kg)? 假设工质为理想气体.

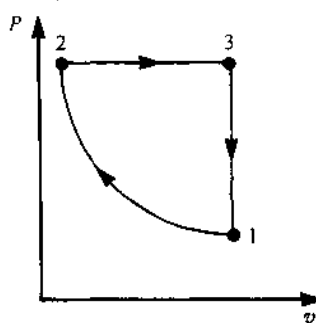


图 7-18

解 (a) 如图 7-18.

(b) 对等熵过程 1→2,

$${}_1w_2 = \frac{P_2 v_2 - P_1 v_1}{k-1} = \frac{(P_1 r^k)(v_1/r) - P_1 v_1}{k-1} = \frac{r^{k-1} - 1}{k-1} RT_1$$

对等压过程 2→3,

$${}_2w_3 = -P_2(v_3 - v_2) = -P_1 r^k(v_1 - \frac{v_1}{r}) = -r^{k-1}(r-1)RT_1$$

因此

$$\begin{aligned} w_{\text{net}} &= -({}_1w_2 + {}_2w_3) = [r^{k-1}(r-1) - \frac{r^{k-1}-1}{k-1}]RT_1 \\ &= \left[(5^{0.4})(4) - \frac{5^{0.4}-1}{0.4} \right] (0.28704)(300) = 461 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

- 7.87 现在利用空气表(半理想气体)重解题 7.86.

解 在等熵压缩中, $V_{c2} = V_{c1}/r = 351.3/5 = 70.26$. 在这点

$$T_2 = 550 + [(70.26 - 75.21)/(59.78 - 75.21)](50) = 566 \text{ K}$$

$$u_2 = 397.2 + (16/50)(37.9) = 409.3 \text{ kJ/kg}$$

则

$${}_1w_2 = u_2 - u_1 = 409.3 - 214.1 = 195 \text{ kJ/kg}$$

沿着等压过程,

$$\begin{aligned} {}_2w_3 &= -(P_3 v_3 - P_2 v_2) = -R(T_3 - T_2) = -R(rT_2 - T_2) = -R(r-1)T_2 \\ &= -(0.28704)(4)(566) = -650 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

因此,

$$w_{\text{net}} = 650 - 195 = 455 \text{ kJ/kg}$$

这个结果与由题 7.86 得出的结果非常接近,但两个结果都不现实,这是由于有离解效应.

- 7.88 题 7.86 中的数据有变化:现在压缩比为 6:1,初始温度为 60°F,以 Btu/lb_m 为单位求解(b).

解

$$\begin{aligned} w_{\text{net}} &= \left[r^{k-1}(r-1) - \frac{r^{k-1}-1}{k-1} \right] RT_1 \\ &= \left[(6^{0.4})(5) - \frac{6^{0.4}-1}{0.4} \right] (0.06856)(520) = 272 \text{ Btu/lb}_m \end{aligned}$$

- 7.89 利用空气表(半理想气体)重解题 7.88.

解 在等熵压缩中, $V_{c2} = V_{c1}/r = 337.5/6 = 64.58$,

因而

$$T_2 = 1000 + [(73.45 - 64.58)/(73.45 - 57.63)](100) = 1056^\circ\text{R}$$

$$u_2 = 172.6 + 10.2 = 182.8 \text{ Btu/lb}_m$$

则

$${}_1w_2 = u_2 - u_1 = 182.8 - 88.6 = 94.2 \text{ Btu/lb}_m$$

沿着等压过程

$$\begin{aligned} {}_2w_3 &= -(P_3 v_3 - P_2 v_2) = -R(T_3 - T_2) = -R(rT_2 - T_2) \\ &= -R(r-1)T_2 = -(0.06856)(5)(1056) = -362.0 \text{ Btu/lb}_m \end{aligned}$$

因此 $w_{\text{net}} = 362.0 - 94.2 = 268 \text{ Btu/lb}_m$, (题 7.87 的评注在这里也适用)

- 7.90** 如果按题 7.88 中的装置运行,那么你的花费将很大,因为燃料只燃烧到冲程的 10%。如果初时温度和压缩比与题 7.88 中相同,初时压强为 15psia,计算每循环的净功(Btu/lb_m)。

解 根据图 7-17,由理想气体定律得

因为 $P_1 = 15 \text{ psia}$, $T_1 = 520^\circ \text{R}$, $v_1 = 12.84 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, 所以 $v_2 = (1/r)v_1 = (1/6)(12.84) = 2.14 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$,

$$T_2 = r^{k-1} T_1 = (6^{0.4})(520) = 1064.8^\circ \text{R}$$

$$\text{冲程} \quad v_1 - v_2 = 12.84 - 2.14 = 10.70 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

$$\text{则} \quad v_3 = v_2 + (0.10)(10.70) = 2.14 + 1.07 = 3.21 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

$$r_c = v_2/v_3 = 3.21/2.14 = 1.50$$

$$T_3 = r_c T_2 = (1.50)(1064.8) = 1597.3^\circ \text{R}$$

$$q_h = c_p(T_3 - T_2) = (0.24)(1597.3 - 1064.8) = 127.8 \text{ Btu/lb}_m$$

因为 $r = 6$, $r_c = 1.50$, 由题 7.75 的公式(2), 得 $\eta = 0.4669$ 。

所以 $w_{\text{net}} = \eta q_h = (0.4669)(127.8) = 59.7 \text{ Btu/lb}_m$

- 7.91** 参见题 7.90,你若换用比能高 10% 的品牌的柴油,输出功将增加多少(Btu/lb_m)?

解 如果现在 $q_h = (1.10)(127.8) = 140.6 \text{ Btu/lb}_m$, 那么

$$T_3 = T_2 + (q_h/c_p) = 1064.8 + (140.6/0.24) = 1650.6^\circ \text{R}$$

以及

$$r_c = T_3/T_2 = 1650.6/1064.8 = 1.55$$

因为 $r = 6$, $r_c = 1.55$, 由题 7.75 的公式(2), 得

$$\eta = 0.4628$$

因此 $w_{\text{net}} = \eta q_h = (0.4628)(140.6) = 65.1 \text{ Btu/lb}_m$, [就像推测的那样,输出功的增量小于 10%]

- 7.92** 分析某狄塞尔循环得到表 7-20。(a)如果膨胀比不变,那么循环热效率增加 5% 时压缩比为多少?(b)每循环中加入的热量改变多少(kJ/kg)?

解 (a)假定空气是理想气体,比较表 7-20 和表 7-16, 得

表 7-20

状态	P/bar	V/m^3	T/K
1	1	0.8611	300
2	48.50	0.0538	909
3	48.50	0.0888	1500
4	2.02	0.8611	604.6

$$r = (909/303)^{1/1.4} = 15.98$$

$$r_c = 1500/909 = 1.650$$

$$\text{而} \quad \eta = 1 - \frac{1}{k} \frac{r_c^k - 1}{r^k - 1} = 1 - \frac{1}{1.4} \frac{1.65^{1.4} - 1}{15.98^{1.4} - 1} = 0.6315$$

$$\text{如果热效率提高 5\%, 则} \quad \eta = (1.05)(0.6315) = 0.6631$$

$$\text{因为 } r_c = 1.650 \text{ 不变, 则} \quad 0.6631 = 1 - (1/r_c^k)(1/r^k - 1)$$

$$\text{解得} \quad r = 20$$

$$\text{(b) 如果 } r = 20, \text{ 则} \quad T_2 = T_1 r^{k-1} = (300)(20^{0.4}) = 994 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} T_3 &= r_c T_2, \Delta q_h = c_p(\Delta T_3 - \Delta T_2) = c_p(r_c - 1)\Delta T_2 \\ &= (1.005)(0.650)(994 - 909) = 55.5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

萨巴提-特雷克(Sabatier-Trinkler)混合循环

- 7.93** 分别在 $P-V$ 图和 $T-S$ 图上画出混合循环。

解 见图 7-19。

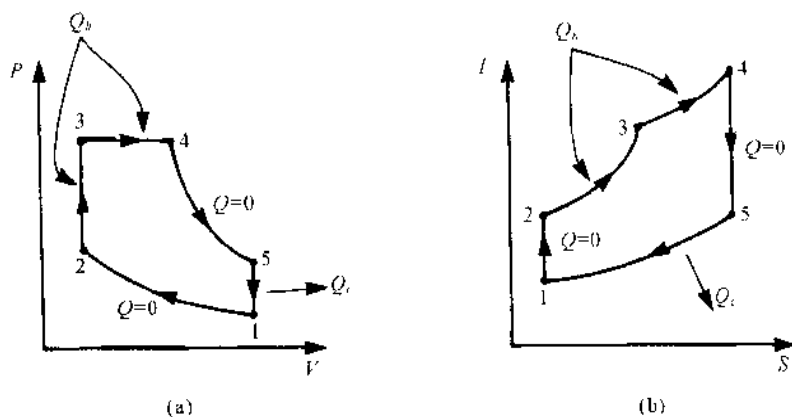


图 7-19

7.94 列表表示混合循环中各状态压强、体积和温度, 将这些量表示为初始参量, 压缩比 $r = V_1/V_2$, 压强比 $r_p = P_3/P_2$ 以及膨胀比 $r_c = V_4/V_5$ 的函数。(见图 7-19)。假设空气为理想气体。

解 根据理想气体关系可以求出各状态参量, 从而建立表 7-21。

表 7-21

状态	P	V	T
1	P_1	V_1	T_1
2	$r^k P_1$	$(1/r)V_1$	$r^{k-1} T_1$
3	$r_p r^k P_1$	$(1/r)V_1$	$r_p r^{k-1} T_1$
4	$r_p r^k P_1$	$(r_c/r)V_1$	$r_c r_p r^{k-1} T_1$
5	$r_c^k r_p P_1$	V_1	$r_c^k r_p T_1$

7.95 (a) 根据表 7-21 中的参数; (b) 如果空气是半理想气体或更普通的气体, 分别推出混合循环热效率的公式。

解 (a) 根据图 7-19 的标号,

$$Q_h = {}_2Q_3 + {}_3Q_4 = m[c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)]$$

$$= m[c_v(r_p - 1) + c_p(r_c - 1)r_p]r^{k-1}T_1$$

同理

$$Q_c = -{}_5Q_1 = mc_v(T_5 - T_1) = mc_v(r_c^k r_p - 1)T_1$$

因此 $\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{(T_3 - T_2) + k(T_4 - T_3)} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{r_c^k r_p - 1}{r_p - 1 + k(r_c - 1)r_p}$

(b) 对于普通气体来说,

$$Q_h = {}_2Q_3 + {}_3Q_4 = m(u_3 - u_2) + m(h_4 - h_3)$$

$$Q_c = -{}_5Q_1 = m(u_5 - u_1)$$

因此

$$\eta = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{u_5 - u_1}{u_3 - u_2 + h_4 - h_3}$$

7.96^D 某混合循环中空气的初始条件为 1bar 和 300K, 压缩比为 16:1, 循环中达到的最大压强的和最高温度分别为 80bar 和 2500K。(a) 计算循环中各点的参量 P (bar), v (m^3/kg) 和 T (K); (b) 计算循环的热效率(%). 假设空气是理想气体。

解 (a) 根据图 7-19, 在初始点, $P_1 = 1\text{bar}$, $T = 300\text{K}$, 利用理想气体方程可计算 v_1 为

$$RT_1/P_1 = (0.28704)(300)/100 = 0.8610\text{m}^3$$

已知 $r=16$, 那么(由表 7-21)得

$$r_p = P_3/P_1 = (80)(16^{-7/5})/1 = 1.6495$$

$$r_c = T_4/r_p r^{k-1} T_1 = 2500/(1.6495)(16^{5/5})(300) = 1.6673$$

现在可以完成表 7-21, 得表 7-22。

表 7-22

状态	P/bar	$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	T/K
1	1	0.8610	300
2	48.50	0.0538	909
3	80.00	0.0538	1500
4	80.00	0.0897	2500
5	3.37	0.8611	1012

(b) 因为 r, r_p, r_c 和 (a) 中一样, 根据题 7.95(a) 中的公式可得 $\eta = 0.6425 = 64.3\%$.

7.97^D 对于题 7.96 中的混合循环, 列表表示循环中每一过程的热量(kJ/kg)、功(kJ/kg)和内能的改变(kJ/kg), 并通过对整个循环的求和检验你的结果.

解 1→2, 是一个可逆绝热过程,

$${}_1w_2 = c_v(T_2 - T_1) = (0.718)(909 - 300) = 437.3 \text{ kJ/kg} = \Delta u$$

$$2 \rightarrow 3, \quad {}_2q_3 = c_v(T_3 - T_2) = (0.718)(1500 - 909) = 424.1 \text{ kJ/kg} = \Delta u$$

3→4, 是一个对外做功的等压过程,

$${}_3q_4 = h_4 - h_3 = c_p(T_4 - T_3) = (1.005)(2500 - 1500) = 1005 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta u = c_v(T_4 - T_3) = (0.718)(2500 - 1500) = 718 \text{ kJ/kg}$$

$${}_3w_4 = -P_3(v_4 - v_3) = -(8000)(0.0897 - 0.0538) = -287.2 \text{ kJ/kg}$$

4→5, 膨胀功为

$${}_4w_5 = c_v(T_5 - T_4) = (0.718)(1012 - 2500) = -1068.6 \text{ kJ/kg} = \Delta u$$

5→1, 体积为常数, 则不做功, 热量交换的数值等于内能的改变

$$\Delta u = c_v(T_1 - T_5) = (0.718)(300 - 1012) = -511.0 \text{ kJ/kg} = {}_5q_1$$

看表 7-23.

表 7-23

状态	$q/(\text{kJ/kg})$	$w/(\text{kJ/kg})$	$\Delta u/(\text{kJ/kg})$
1	0	437.3	437.3
2	424.1	0	424.1
3	1005.0	-287.2	718.0
4	0	-1068.6	-1068.6
5	-511.0	0	-511.0
1			
\oint	918.1	-918.5	-0.2

7.98^D 假设空气为半理想气体, 求解题 7.96, 体积的数值可略去不解.

解 (a) 根据图 7-19, 初始条件和题 7.96 中一样, $r=16, P_1=80\text{bar}, T_1=2500\text{K}$. 那么 1→2 是等熵过程, $V_2=V_1/r=351.3/16=21.96$, 反向内插, 得

$$T_2 = 850 + [(22.87 - 21.96)/(22.87 - 19.39)](50) = 863.1\text{K}$$

因而

$$u_2 = 633.8 + (13.1/50)41.3 = 644.6 \text{ kJ/kg}$$

且

$$P_2 = P_1(P_2/P_1) = 1(113.65/2.451) = 46.37\text{bar}$$

2→3 是等容过程, 所以

$$T_3 = T_2(P_3/P_2) = (863.1)(80/46.37) = 1489\text{K}$$

则

$$r_c = v_4/v_3 = T_4/T_3 = 2500/1489 = 1.679$$

在此过程吸收的热量为

$${}_2q_3 = u_3 - u_2 = 1199 - 645 = 554 \text{ kJ/kg}$$

在 $T_1=2500\text{K}$ 时空气的性质不符合表 B2. 又一次提醒我们这时空气将发生离解现象. 由俄罗斯表:

$T(\text{K})$	$v(\text{m}^3/\text{kg})$	$h(\text{kJ/kg})$	$u(\text{kJ/kg})$	P_r	V_r
2500	7.198	3012	2294	9730	0.737

$$\begin{aligned} q_1 &= h_4 - h_3 = 3012 - 1626 = 1386 \text{ kJ/kg} \\ q_h &= q_2 + q_1 = 1940 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

4→5 为等熵膨胀过程,

$$V_{r1}/V_{r5} = v_1/v_5 = r_c/r$$

$$\text{因而 } V_{r5} = V_{r1}(r/r_1) = (0.737)(16/1.679) = 7.026$$

$$\text{则 } T_5 = 1250 + [(7.213 - 7.026)/(7.213 - 6.382)](50) = 1261.3 \text{ K}$$

在此温度时,

$$u_5 = 978.7 + (11.3/50)45 = 988.8 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{得出 } q_c = u_5 - u_1 = 988.8 - 214.1 = 774.7 \text{ kJ/kg}$$

最后为等体过程,

$$P_5 = (T_5/T_1)P_1 = (1261.3/300)(1) = 4.20 \text{ bar}$$

$$\text{(b) } \eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (774.7/1940) = 0.6006 = 60.1\%$$

7.99^D 某混合循环中的理想空气的初时条件为 1bar, 300K, 循环中最高温度为 2000K. 如果在等体和等压的燃烧过程中释放给每 kg 空气的热量是 q kJ, 假设压缩比为 5:1, 计算 q .

解 根据图 7-19 中的标号,

$$T_2 = T_1(v_1/v_2)^{\gamma-1} = (300)(15^{0.4}) = 886.3 \text{ K}$$

$$2 \rightarrow 3, \quad q = c_v(T_3 - T_2) = (0.718)(T_3 - 886.3)$$

$$3 \rightarrow 4, \quad q = c_p(T_1 - T_3) = (1.005)(2000 - T_3)$$

$$\text{解得 } 0.718T_3 - 636.4 = 2010 - 1.005T_3$$

$$\text{则 } T_3 = 1535.7 \text{ K}$$

$$\text{因而 } q = 466.5 \text{ kJ/kg}$$

7.100^D 如果空气是半理想气体, 重解题 7.99.

解 根据图 7-19 中的标号.

$$V_{r2} = V_{r1}/r = 351.3/15 = 23.42$$

$$\text{则 } T_2 = 800 + [(27.11 - 23.42)/(27.11 - 22.87)](50) = 843.5 \text{ K}$$

$$\text{在这点, } u_2 = 592.9 + (43.5/50)(40.9) = 628.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{在 } T_4 = 2000 \text{ K 时, } h_4 = 2280 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{因而 } q = u_3 - 628.5 = 2280 - h_3 \quad \text{即} \quad h_3 + u_1 = 2909$$

计算如下:

$$\text{在 } 1500 \text{ K 时, } h + u = 1640 + 1209 = 2849 \text{ (太低)}$$

$$\text{在 } 1550 \text{ K 时, } h + u = 1702 + 1257 = 2959 \text{ (太高)}$$

那么由线性内插, 得

$$T_3 = 1500 + [(2909 - 2849)/(2959 - 2849)](50) = 1527 \text{ K}$$

$$\text{在此温度时, } h = 1674 \text{ kJ/kg} \quad u = 1238 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{得 } q = 606 \text{ kJ/kg}$$

7.101^D 15psia, 500°R 的空气等熵压缩到原体积的 10% 然后经等体加热至压强 1000psia, 接着经等压加热至温度 4000°R, 最后等熵膨胀至原体积. (a) 列表表示各状态压强 (psia)、比体积 (ft³/lb_m) 和温度 (°R); (b) 计算循环的热效率 (%). 假设空气是理想气体.

解 (a) 根据图 7-19, 初时 $P_1 = 15 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$, $T_1 = 500^\circ\text{R}$. 由理想气体第一定律, 得

$$v_1 = RT_1/P_1 = (53.35)(500)/(15 \times 144) = 12.35 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

由题意知 $r = 10$, 那么 (由表 7-21),

$$r_p = P_3/r^k/P_1 = (1000)(10^{-7/5})/15 = 10^{8/5}/15 = 2.653$$

$$r_c = T_4/r^{k-1}/T_1 = 4000/(10^{8/5}/15)(10^{2/5})(500) = 60000/50000 = 1.2$$

现在可以完成表 7-21 得到表 7-24.

表 7-24

状态	P , psia	v , (ft ³ /lb _m)	T , °R
1	15	12.35	500
2	377	1.235	1256
3	1000	1.235	3332
4	1000	1.482	4000
5	51.4	12.35	1713

(b) r , r_p , r_c 和 (a) 中一样, 由题 7.95(a) 中的公式, 得

$$\eta = 0.2410 = 24.1\%$$

7.102^D 通过计算各过程的热量传递、功和内能的变化以及这些量的循环求和检验题 7.101 得到的结果。

解 1→2, ${}_1w_2 = c_v(T_2 - T_1) = (0.171)(1256 - 500) = 129.3 \text{ Btu/lb}_m = \Delta u$

2→3, ${}_2q_3 = \Delta u = c_v(T_3 - T_2) = (0.171)(3332 - 1256) = 355.0 \text{ Btu/lb}_m$

3→4, 等压加热,

$${}_3q_4 = \Delta h = c_p(T_4 - T_3) = (0.240)(4000 - 3332) = 160.3 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\Delta u = c_v(T_4 - T_3) = (0.171)(4000 - 3332) = 114.2 \text{ Btu/lb}_m$$

$${}_3w_4 = -P_3(v_4 - v_3) = -(1000 \times 144)(1.482 - 1.235)/778.16 = -45.7 \text{ Btu/lb}_m$$

4→5, ${}_4w_5 = c_v(T_5 - T_4) = (0.171)(1713 - 4000) = -391.1 \text{ Btu/lb}_m = \Delta u$

排气过程体积不变,

$$\Delta u = c_v(T_1 - T_5) = (0.171)(500 - 1713) = -207.4 \text{ Btu/lb}_m = {}_5q_1$$

见表 7-25.

表 7-25

状态	q (Btu/lb _m)	w (Btu/lb _m)	Δu (Btu/lb _m)
1			
2	0	129.3	129.3
3	355.0	0	355.0
4	160.3	-45.7	114.2
5	0	-391.1	-391.1
1	-207.4	0	-207.4
\oint	307.9	-307.5	0.0

7.103^D 假设空气为半理想气体求解题 7.101, 略去求解体积。

解 (a) 由图 7-19, 初始条件和题 7.101 中一样,

$$r = 10 \quad P_3 = 1000 \text{ psia} \quad T_4 = 4000^\circ \text{R}$$

对等熵压缩 1→2 过程, $V_{r2} = V_{r1}/r = 426.8/10 = 42.68$, 则

$$T_2 = 1200 + [(45.61 - 42.68)/(45.61 - 36.50)](100) = 1232^\circ \text{R}$$

$$u_2 = 209.3 + (32/100)(18.8) = 215.3 \text{ Btu/lb}_m$$

$$P_2 = P_1(P_3/P_1) = (15)(46.70/1.868) = 375 \text{ psia}$$

在等容过程 2→3 中吸热, 则

$$T_3 = T_2(P_3/P_2) = (1232)(1000/375) = 3285^\circ \text{R}$$

在此温度时

$$u_3 = 636.0 + (85/200)(48.6) = 656.7 \text{ Btu/lb}_m$$

在 $T_4 = 4000^\circ \text{R}$ 时 $u_4 = 833.8 \text{ Btu/lb}_m$, 则

$$r_c = T_4/T_3 = 4000/3285 = 1.218$$

在等熵膨胀过程 4→5 中,

$$V_{r5}/V_{r4} = v_4/v_5 = r_c/r$$

因而

$$V_{r5} = V_{r4}(r/r_c) = (1.121)(10/1.218) = 9.204$$

则

$$T_5 = 2000 + [(10.36 - 9.20)/(10.36 - 8.92)] \cdot 2081^\circ \text{R}$$

$$u_5 = 368.1 + (81/100)(20.8) = 384.9 \text{ Btu/lb}_m$$

$$P_5 = P_4 (P_5/P_4) = (1000)(362.6/5688) = 63.7 \text{ psia}$$

(b) 由题 7.95(b), 得

$$\eta = 1 - \frac{u_5 - u_1}{u_5 - u_2 + h_4 - h_3} = 1 - \frac{384.9 - 85.2}{656.7 - 215.3 + 1108.7 - 871.6} = 55.8\%$$

7.104 求题 7.99 中混合循环的(a)输出净功(kJ/kg 空气)和(b)热效率(%).

解 已知 $q_h = 2q = 933 \text{ kJ/kg}$, 所以可以很容易首先求出热效率.

(b) 已知 $r = 15$, $r_p = T_3/T_2 = 1535.7/886.3 = 1.7327$, $r_c = T_1/T_3 = 2000/1535.7 = 1.3023$, 由这些数值及题 7.95(a), 得 $\eta = 65.2\%$.

$$(a) \quad w_{\text{net}} = \eta q_h = (0.652)(933) = 608 \text{ kJ/kg}$$

7.105^D 空气由 15psia, 40°F 的状态经等熵压缩到原体积的 $\frac{1}{10}$, 接着先后经过等容和等压过程, 在这两个过程中吸收的总热量值为 525.9 Btu/lb_m, 温度达 4000°R, 在等容过程中吸收的热量占总热量的百分之多少? 利用理想气体关系求解.

解 与题 7.101 比较, 得 $T_2 = 1256^\circ\text{R}$, 则

$$525.9 = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3) = (0.171)(T_3 - 1256) + (0.240)(4000 - T_3)$$

而 $T_3 = 3178^\circ\text{R}$, 则需求的比率为

$$\frac{(0.171)(3178 - 1256)}{525.9} = 62.5\%$$

阿丁森 (Atkinson) 循环

7.106 理想空气从某初始状态 (P_1, V_1, T_1) 等熵压缩到点 2, 压缩比为 r , 接着经历一个等容吸热过程达到温度为 T_3 , 接着经历一个等熵膨胀过程空气又回到原压强状态点 4, 膨胀比为 s , 最后系统经历一个等压放热过程又回到初始状态. (a) 分别在 $P-V$ 图及 $T-S$ 图上画出这个循环; (b) 列表表示循环中各状态压强、体积和温度.

解 (a) 如图 7-20, 这个循环和奥托循环(图 7-16)的惟一不同之处是, 这里系统膨胀后压强为初始压强, 而体积不是初始值.

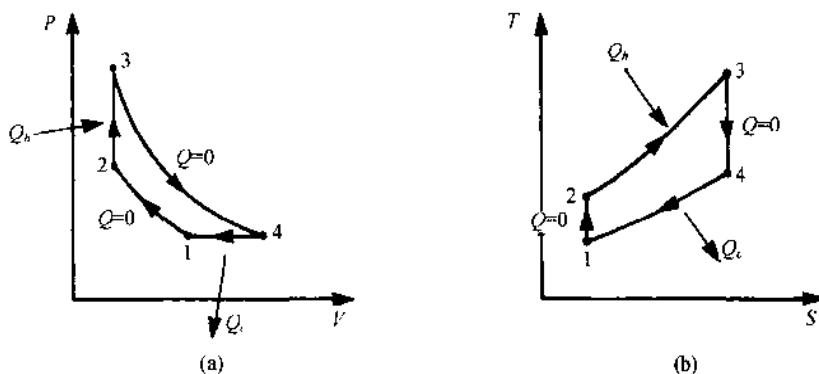


图 7-20

(b) 如表 7-26, 注意 $r = V_1/V_{\min}$, $s = V_{\max}/V_{\min}$. 因此 $s > r$.

表 7-26

状态	P	V	T
1	P_1	V_1	T_1
2	$r^k P_1$	$(1/r)V_1$	$r^{k-1} T_1$
3	$s^k P_1$	$(1/r)V_1$	$(s^k/r) T_1$
4	P_1	$(s/r)V_1$	$(s/r) T_1$

7.107 证明阿丁森循环的热效率为

$$\eta = 1 - k \frac{s-r}{s^k - r^k}$$

解

$$Q_c = mc_p(T_4 - T_1) \quad Q_h = mc_p(T_3 - T_2)$$

因此

$$\eta = 1 - (Q_c/Q_h) = 1 - [k(T_4 - T_1)/(T_3 - T_2)]$$

将表 7-26 中 T_4 , T_3 和 T_2 的表达式代入这个方程可以得到需求的结果。7.108^D 初始状态为 1bar, 300K 的空气可逆绝热压缩到初始体积的 $\frac{1}{10}$, 接着经历一等容加热

过程后状态参量为 25bar 和 1500K, 再接着绝热膨胀到 1bar, 最后经等压放热过程系统又回到初始状态。如果空气是理想气体, 求: (a) 输出净功(kJ/kg); (b) 循环热效率; (c) 输出净功比相应的奥托循环净功高多少(%)?

解 (a) 这个循环是阿丁森循环, 利用表 7-26, 我们可得出 $r=5$, 而且 $s = (P_3/P_1)^{1/k} = 25^{0.7} = 5^{10.7}$, 因此

$$q_h = c_v(T_3 - T_2) = c_v(T_3 - r^{k-1}T_1) = (0.718)[1500 - (5^{10.7})(300)] = 677.0 \text{ kJ/kg}$$

$$q_c = c_p(T_4 - T_1) = c_p[(s/r) - 1]T_1 = (1.005)(5^{3.7} - 1)(300) = 299.5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = q_h - q_c = 677.0 - 299.5 = 367.5 \text{ kJ/kg}$$

$$(b) \quad \eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (299.5/677.0) = 55.1\%$$

(c) 对于类似的奥托循环, q_h 一样, 但现在 (表 7-10)

$$q_c = c_v(T_4 - T_1) = c_v(r^{k-1}T_3 - T_1) = (0.718)[(5^{10.7})(1500) - 300] = 350.3 \text{ kJ/kg}$$

因此

$$(w_{\text{net}})_0 = 677.0 - 350.3 = 316.7 \text{ kJ/kg}$$

$$(\Delta w_{\text{net}})/(w_{\text{net}})_0 = (367.5 - 316.7)/316.7 = 16\%$$

7.109 通过题 7.107 中的公式验证题 7.108(b) 得出的效率。

解

$$\eta = 1 - (1.4) \frac{5^{10.7} - 5}{5^{10.7} - 5^{3.7}} = 1 - (1.4) \frac{9.966 - 5}{25 - 9.518} = 55.1\%$$

7.110^D 初始状态为 15psia, 60°F 的空气经历一可逆绝热压缩过程后体积为初始值的 20%, 接着经等容吸热后温度为 3000°R, 然后经可逆绝热膨胀后压强等于初始值, 最后经等压压缩后体积等于初始值。计算: (a) 在等容过程中加入的热量(Btu/lbm); (b) 循环的热效率(%)。

解 (a) 这个循环是阿丁森循环, 表 7-26 适用。

$$q_h = c_v(T_3 - T_2) = c_v(T_3 - r^{k-1}T_1) = (0.171)[3000 - (5^{0.4})(520)] = 343.7 \text{ Btu/lbm}$$

$$(b) \quad s^k = r(T_3/T_1) = 5(3000/520) = 28.85$$

则

$$s = 11.04$$

由题 7.107 中的公式得 $\eta = 56.3\%$ 。7.111 初始状态为 1bar, 300K 的理想空气可逆绝热压缩到原体积的 $\frac{1}{5}$, 接着在等容过程中

吸收一定的热量 q (kJ/kg), 然后经绝热膨胀回 1 bar 的压强, 最后经等压放热又回到初始状态, 如果每循环的净输出功为 300kJ/kg, 计算 q 。

解

利用表 7-26, $q = q_h = c_v(T_3 - T_2) = (c_v/r)(s^k - r^k)T_1$, $q_c = c_p(T_4 - T_1) = (c_p/r)(s - r)T_1$, 又得 $q_h - q_c = 300 \text{ kJ/kg}$, 将数据代入, 则此式变为下列关于 s 的方程:

$$F(s) = s^{1.4} - 1.4s - 9.482 = 0 \quad (1)$$

根据牛顿迭代法可以求解这个方程, 由题 7.108, 使用初值 $s_{(0)} = 5^{10.7} = 9.966$, 我们得到 $F(s_{(0)}) = 1.566$, $F'(s_{(0)}) = 2.112$, 则下一级近似为

$$s_{(1)} = s_{(0)} - \frac{F(s_{(0)})}{F'(s_{(0)})} = 9.966 - \frac{1.566}{2.112} = 9.225$$

等等, 一直到两次迭代的结果相差很小, s 一旦求出, 根据上面的表达式就可以求出 q 。

A-I-A-L 循环

7.112^D 一热动力循环可近似用标准空气处理,初时状态为 1bar、300K 的空气(视为理想气体)经历一压缩比为 5:1 的绝热压缩过程,然后沿着 $P-v$ 图上的一条直线变化,在这变化过程中吸热达到压强为 20bar,温度为 1500K,接着又绝热膨胀到压强为 2bar,最后系统沿着 $P-v$ 图上一条直线冷却回到初始状态。(a)在 $P-v$ 图上画出这个循环;(b)每千克空气循环净功是多少(kJ/kg)? (c)循环热效率是多少?

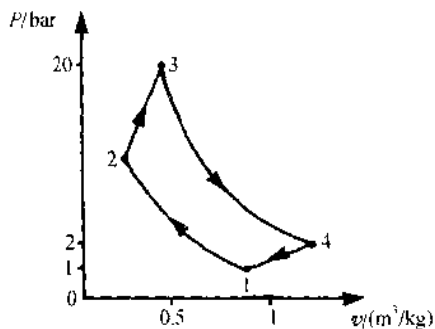


图 7-21

解 (a)如图 7-21,绝热部分(1→2 和 3→4)的大体形状与前面循环图一样。下面根据线性关系确定 2,3 和 4 的位置。

在点 1, $v_1 = RT_1/P_1 = (0.28704)(300)/100 = 0.8610 \text{ m}^3$

在点 2, $v_2 = (1/r)v_1 = (1/5)(0.8610) = 0.1722 \text{ m}^3$

$$P_2 = P_1 (v_1/v_2)^k = P_1 r^k = (1)(5^{1.4}) = 9.518 \text{ bar}$$

在点 3, $v_3 = RT_3/P_3 = (0.28704)(1500)/2000 = 0.2152 \text{ m}^3$

3→4, $v_4 = v_3 (P_3/P_4)^{1/k} = (0.2152)(20/2)^{1/1.4} = 1.1146 \text{ m}^3$

(b)净功由 4 个部分组成, 1→2, 非流动的可逆绝热过程

$${}_1w_2 = c_v(T_2 - T_1) = (0.718)(571.1 - 300) = 194.5 \text{ kJ/kg}$$

这里

$$T_2 = T_1 (v_1/v_2)^{k-1} = (300)(5^{0.4}) = 571.1 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} 2 \rightarrow 3, \quad {}_2w_3 &= - \int_2^3 p dv = - \frac{P_2 + P_3}{2} (v_3 - v_2) = - (1476 \text{ kN/m}^2)(0.0430 \text{ m}^3/\text{kg}) \\ &= -63.5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

3→4, 非流动的可逆绝热过程

$${}_3w_4 = c_v(T_4 - T_3) = (0.718)(776 - 1500) = -518.8 \text{ kJ/kg}$$

而

$$T_4 = T_3 (P_4/P_3)^{(k-1)/k} = (1500)(2/20)^{0.2857} = 776.9 \text{ K}$$

4→1

$${}_4w_1 = - \int_4^1 p dv = - \frac{P_4 + P_1}{2} (v_1 - v_4) = - (150 \text{ kN/m}^2)(-0.2536 \text{ m}^3/\text{kg}) = 38.0 \text{ kJ/kg}$$

则

$$w_{\text{net}} = -({}_1w_2 + {}_2w_3 + {}_3w_4 + {}_4w_1) = 349.8 \text{ kJ/kg}$$

(c)

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h$$

2→3 吸热,

$$\Delta u = c_v(T_3 - T_2) = (0.718)(1500 - 571) = 667.0 \text{ kJ/kg}$$

因此

$${}_2q_3 = -q_h = -\Delta u - {}_2w_3 = 667.0 - (-63.5) = 730.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = 349.8/730.5 = 0.4789 = 47.9\%$$

7.113 通过列表表示循环中各过程的热传递, 功以及内能的改变和这些量对整个循环的求和, 证明题 7.112 得到的结果, 并验证上题求得的热效率。

解 如表 7-27, 计算得 $q_c = -{}_1q_1$, 因此 $\eta = 1 - (380.4/730.5) = 0.4793$, 得证。

表 7-27

状态	q (kJ/kg)	w (kJ/kg)	Δu (kJ/kg)
1	0.0	194.5	194.5
2	730.5	-63.5	667.0
3	0.0	-518.8	-518.8
4	-380.4	38.0	-342.4
1			
\oint	350.1	-349.8	0.3

- 7.114 初始状态为 15psia, 40°F 的空气(视为理想气体)绝热压缩到原体积的 20%, 然后吸热并沿着 $P-v$ 图上一条直线变化到温度为 2700°R, 压强为 300psia, 接着绝热膨胀到压强为 30psia, 最后系统沿着 $P-v$ 图上一条直线冷却回到初始状态。(a) 求出循环中各点在 $P-v$ 图上的位置; (b) 每循环净功是多少(Btu/lb_m)? (c) 循环热效率是多少(%)?

解 (a) 入口处(图 7-21 中的点 1),

$$v_1 = RT_1/P_1 = (53.35)(500)/(15 \times 144) = 12.35 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

点 2,

$$P_2 = P_1(v_1/v_2)^k = (15)(5^{1.4}) = 142.8 \text{ psia}$$

$$v_2 = (1/5)(12.35) = 2.47 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

点 3,

$$v_3 = RT_3/P_3 = (53.35)(2700)/(300 \times 144) = 3.334 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

3→4, 可逆绝热,

$$v_4 = v_3(P_3/P_4)^{1/k} = (3.334)(300/30)^{1/1.4} = 12.27 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

(b) 净功包含四个部分,

1→2, 非流动的可逆绝热过程,

$${}_1w_2 = c_v(T_2 - T_1) = (0.171)(951.9 - 500) = 77.5 \text{ Btu/lb}_m$$

那时

$$T_2 = T_1 r^{k-1} = (500)(5^{0.4}) = 951.9^\circ \text{R}$$

2→3,

$${}_2w_3 = -\int_2^3 P dv = -\frac{P_2 + P_3}{2}(v_3 - v_2) = -(221.4 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2)(0.863 \text{ ft}^3/\text{lb}_m)$$

$$= -27546 \text{ ft}^2/\text{lb}_m = -35.40 \text{ Btu/lb}_m$$

3→4, 非流动的绝热膨胀过程,

$${}_3w_4 = c_v(T_4 - T_3) = (0.171)(1398 - 2700) = -223.2 \text{ Btu/lb}_m$$

这里

$$T_4 = T_3(P_4/P_3)^{(k-1)/k} = (2700)(3/30)^{0.2857} = 1398^\circ \text{R}$$

4→1,

$${}_4w_1 = -\int_4^1 P dv = -\frac{P_4 + P_1}{2}(v_1 - v_4)$$

$$= -(22.5 \times 144)(-4.92) = 15940 \text{ ft}^2/\text{lb}_m = 20.48 \text{ Btu/lb}_m$$

因此

$$w_{\text{net}} = ({}_1w_2 + {}_2w_3 + {}_3w_4 + {}_4w_1) = 160.6 \text{ Btu/lb}_m$$

(c) 循环中 2→3 吸热,

$$\Delta u = c_v(T_3 - T_2) = (0.171)(2700 - 952) = 299.0 \text{ Btu/lb}_m$$

$$q_h = {}_2q_3 = \Delta u - {}_2w_3 = 299.0 - (-35.4) = 334.4 \text{ Btu/lb}_m$$

因而

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = 160.6/334.4 = 48.0\%$$

- 7.115 通过列表表示循环中各过程的热传递、功以及内能的变化, 并将这些量对整个循环求和, 从而证明题 7.114 的结果。

解 如表 7-28。

表 7-28

状态	q (Btu/lb _m)	w (Btu/lb _m)	Δu (Btu/lb _m)
1	0	77.5	77.5
2	334.4	-35.4	299.0
3	0	-223.2	-223.2
4	-174.1	20.5	-153.6
1			
\oint	160.3	-160.6	-0.3

混杂循环

- 7.116 史密特(Schmidt)兄弟是很强的竞争对手,两人提出了一个理想空气循环,此循环的起始点1(如图7-22)的状态参量为1bar,300K,压缩比为6:1,卡尔·史密特提出以汽油为燃料按奥托循环12341运行,最高温度为 $T_3 = 1250\text{K}$,威廉·史密特提出也以汽油为燃料按混合循环125641运行,且 $r_p = P_5/P_2 = 2.0$. 卡尔提出的循环产出的功多多少(kJ/kg空气)?

解 卡尔循环比威廉循环多出的功等于如图7-22中三角形536的面积,其中曲线方程为 $pv^k = P_3 v_3^k$,所以,

$$\begin{aligned} \text{面积} &= \int_{v_3}^{v_6} (P - P_5) dv = \int_{v_3}^{v_6} \left(\frac{P_3 v_3^k}{v^k} - P_5 \right) dv \\ &= \frac{P_3 v_3}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_6} \right)^{k-1} \right] - P_5 v_3 \left(\frac{v_6}{v_3} - 1 \right) \end{aligned}$$

但是根据已知条件只能求出

$$P_3 v_3 = RT_3, v_3 = v_2 = v_1/r, P_5 = r_p P_2 = r_p r^k P_1$$

还必须求 $v_6/v_1 (=r_c)$

$$\left(\frac{v_3}{v_5} \right)^k = \frac{P_5}{P_3} = \frac{P_5}{P_3} = \frac{r_p r^k P_1}{RT_3/v_3} = \frac{r_p r^{k-1} P_1 v_1}{RT_3} = \frac{r_p r^{k-1} T_1}{T_3}$$

因而,令

$$a \equiv r_p r^{k-1} = (2.0)(6^{0.4}) = 4.0954$$

$$\beta \equiv a T_1/T_3 = (4.0954)(300/1250) = 0.9829$$

$$\begin{aligned} \text{面积} &= c_v T_3 (1 - \beta^{k-1/k}) - a R T_1 (\beta^{1/k} - 1) \\ &= c_v T_3 (1 - \beta^{k-1/k}) - \beta R T_3 (\beta^{1/k} - 1) \\ &= [(1 - \beta) c_v - (\beta^{1/k} - 1) \beta c_p] T_3 \\ &= [(0.0171)(0.718) - (0.0124)(0.9829)(1.005)](1250) \\ &= (0.00003)(1250) = 0.04 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

这个值很小可以忽略,原因是 $r_c = \beta^{1/k} = 1.0124$,接近于1.

- 7.117 如图7-23,某循环在 $T-S$ 图上的曲线为一个圆,最高和最低温度分别为600K和300K,其效率是多少(%)?

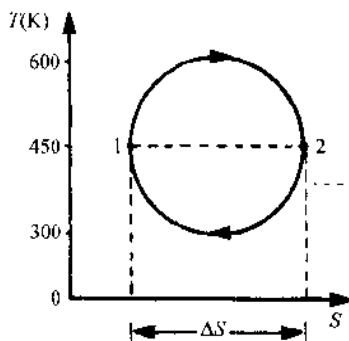


图7-23

解

$$W_{\text{net}} = (\text{循环曲线所围的面积}) = \pi(300)^2/4$$

$$Q_h = {}_1Q_2 = (\text{上半个圆的面积} + \text{矩形面积}) = [\pi(300)^2/8] + (300)(450)$$

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_h} = \frac{\pi(300)^2/4}{[\pi(300)^2/8] + (300)(450)} = \frac{2\pi}{\pi + 12} = 0.415$$

7.118 参见题 7.117, 证明从热力学角度看在任何两个温度 T_{\max} 和 T_{\min} 之间进行的圆循环都可能存在.

解 根据题 7.117 中的几何方法, 可以得任一假定的循环的效率为

$$\eta = 1 - \frac{4(T_{\max}^2 - T_{\min}^2) - \pi(T_{\max} - T_{\min})^2}{\pi(T_{\max} - T_{\min})^2 + 4(T_{\max}^2 - T_{\min}^2)}$$

但 $\pi < 1$

$$\text{所以, } \eta < 1 - \frac{4(T_{\max}^2 - T_{\min}^2) - 4(T_{\max} - T_{\min})^2}{4(T_{\max} - T_{\min})^2 + 4(T_{\max}^2 - T_{\min}^2)} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}} = \eta^*$$

这个效率比卡诺循环效率小, 所以根据第二定律知这个(不可逆)循环是可以进行的.

开放系统: 布雷顿(Brayton)和斯特令(Stirling)循环

在此以前讨论的都是封闭式循环(奥托、狄塞尔循环等), 一定质量的气体遵守第一定律 $Q+W=\Delta U$, 接下来讨论的问题中, 循环的工作物质是循环流动的气体, $Q+W=\Delta H$. 和通常一样, W 代表轴功, 在循环中有热传递现象发生时, 设 $W=0$.

7.119 (a) 画图表示理想布雷顿循环; (b) 证明其效率为 $\eta=1-1/r_p^{(k-1)/k}$, 这里 $r_p=(\text{压强比})=(\text{高循环压强/低循环压强})$, 为什么这个结果没有实际意义?

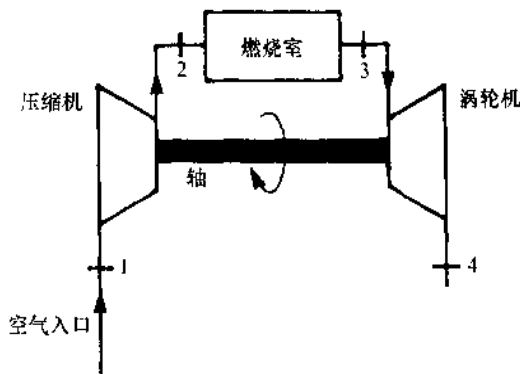


图 7-24

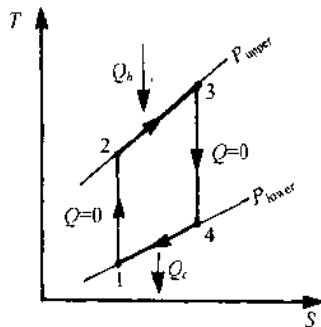


图 7-25

解 (a) 在这简单循环中, 空气等熵通过转动式压缩机(图 7-24)后温度和压强都增加. 在 $T-S$ 图上, 等压线大致沿着东北—西南方向, 其中较高压强的等压线更偏北, 因而从 1 到 2 的移动如图 7-25 所示, 然后将燃料喷入到热空气中并在常压下燃烧. 一般处理时, 我们用从外界高源热源吸热代替内部加热而到达点 3, 然后此混合物进入涡轮机膨胀, 经理想绝热膨胀后, 系统回到初始压强(点 4), 最后从汽轮机排出的气体在初始压强下冷却后回到初始温度.

(b) 对一个可逆绝热过程应用理想气体方程

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(k-1)/k} \quad \text{及} \quad T_3/T_4 = (P_3/P_4)^{(k-1)/k}$$

但 $P_3=P_2, P_4=P_1$, 所以 $T_2/T_1 = T_3/T_4$, 即 $T_4/T_1 = T_3/T_2$. 热效率为 $\eta=1-Q_c/Q_h$, 因为发生热交换时没有做功, 所以 $Q=\Delta H=mc_p\Delta T$, 则 $Q_c=mc_p(T_4-T_1), Q_h=mc_p(T_3-T_2)$,

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \frac{(T_4/T_1)}{(T_3/T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \\ &= 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}} \end{aligned}$$

因为在实际压缩机和汽轮机中的过程是不可逆的, 所以不可能达到这个 η 值, 更不必说在其他部件中的不可逆性了.

7.120^D 某理想空气布雷顿循环(图 7-25)在 1bar, 300K(点 1)和 5bar, 1000K(点 3)之间工作, 涡轮压缩机和涡轮汽轮机的效率为 100%. (a) 循环热效率是多少? (b) 输出净功是多少(kJ/kg 空气)? (c) 涡轮压缩机需要的能量占涡轮汽轮机输出的总能量的多少(%)?

解 (a) 由题 7.119(b), 得 $\eta=1-r_p^{(1-k)/k}=1-5^{-2/7}=0.3687$.

$$\begin{aligned}
 (b) \quad q_h &= c_p(T_3 - T_2) = c_p T_1 \left(\frac{T_3}{T_1} - r_p^{(k-1)/k} \right) \\
 &= (1.005)(300) \left(\frac{1000}{300} - 5^{2/7} \right) = 527.5 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

因此,

$$w_{\text{net}} = \eta q_h = (0.3687)(527.5) = 194.5 \text{ kJ/kg}$$

(c) 涡轮汽轮机输出功为

$$w_s = c_p(T_3 - T_4) = c_p T_3 (1 - r_p^{(1-k)/k}) = \eta c_p T_3$$

因为 $w_{\text{net}} = w_s - w_c$, 所以需求的比为

$$\begin{aligned}
 \frac{w_s}{w_c} &= 1 - \frac{w_{\text{net}}}{w_c} = 1 - \frac{q_h}{c_p T_3} = \frac{T_2}{T_3} \\
 &= \frac{T_1}{T_3} r_p^{(k-1)/k} = \frac{T_1}{(1-\eta)T_3} = \frac{300}{(0.6313)(1000)} = 47.5\%
 \end{aligned}$$

即使其他部件的效率都是 100%, 那么也需用大概为输出能量的一半能量去驱动这台发动机。

- 7.121 某理想布雷顿循环(图 7-25)在 15psia, 60°F(点 1)和 100psia, 1500°F(点 3)之间工作, 压缩机和汽轮机的效率为 100%。(a) 热效率是多少(%)? (b) 循环净输出功是多少(Btu/lb_m)? (c) 压缩机所需的能量占汽轮机输出功的多少(%)?

解 7-21 (a) 由题 7.119(b), 得 $\eta = 1 - r_p^{(1-k)/k} = 1 - (100/15)^{-2/7} = 0.4183 = 41.8\%$ 。

$$\begin{aligned}
 (b) \quad q_h &= c_p(T_3 - T_2) = c_p T_1 \left(\frac{T_3}{T_1} - \frac{1}{1-\eta} \right) = (0.240)(520) \left(\frac{1960}{520} - \frac{1}{0.5817} \right) \\
 &= 255.8 \text{ Btu/lb}_m
 \end{aligned}$$

因而,

$$w_{\text{net}} = \eta q_h = (0.4183)(255.8) = 107 \text{ Btu/lb}_m$$

(c) 由题 7.120(c) 中公式有

$$\text{比} = T_1 / (1 - \eta) T_3 = 520 / (0.5817)(1960) = 45.6\%$$

- 7.122 通过计算热量、功和焓变以及证明这些量对循环求和的正确性, 从第一定律的角度分析题 7.120 中的布雷顿循环。

$$\begin{aligned}
 \text{解 7-22} \quad 1 \rightarrow 2, \quad {}_1q_2 &= 0, \quad {}_1w_2 = \Delta h = c_p(T_2 - T_1) = c_p T_1 (r_p^{(k-1)/k} - 1) \\
 &= (1.005)(300)(5^{2/7} - 1) = 176.0 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

$$2 \rightarrow 3, \quad {}_2q_3 = q_h = 527.5 \text{ kJ/kg (根据题 7.120 得)}, \quad {}_2w_3 = 0,$$

$$\text{因而} \quad \Delta h = {}_2q_3 = 527.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\begin{aligned}
 3 \rightarrow 4, \quad {}_3q_4 &= 0, \quad {}_3w_4 = -w_c = c_p(T_4 - T_3) = c_p T_3 (r_p^{(1-k)/k} - 1) \\
 &= (1.005)(1000)(5^{2/7} - 1) = -370.5 \text{ kJ/kg} = \Delta h
 \end{aligned}$$

$$\text{最后, } 4 \rightarrow 1, \quad {}_4w_1 = 0,$$

$$\begin{aligned}
 \Delta h &= c_p(T_1 - T_4) = c_p(T_1 - r_p^{(1-k)/k} T_3) = (1.005)(300 - 5^{2/7} \times 1000) \\
 &= -333.1 \text{ kJ/kg} = {}_4q_1 = -q_c
 \end{aligned}$$

见表 7-29。

表 7-29

状态	$q / (\text{kJ/kg})$	$w / (\text{kJ/kg})$	$\Delta h / (\text{kJ/kg})$
1	0	176.0	176.0
2	527.5	0.0	527.5
3	0	-370.5	-370.5
4	-333.1	0.0	-333.1
1			
\oint	194.4	-194.5	-0.1

- 7.123 计算热量、功和焓变并证明这些量对循环求和的正确性, 从第一定律的角度分析题 7.121 中的布雷顿循环。

$$\begin{aligned}
 \text{解 7-23} \quad 1 \rightarrow 2, \quad {}_1q_2 &= 0, \quad {}_1w_2 = \Delta h = c_p(T_2 - T_1) = c_p T_1 (r_p^{(k-1)/k} - 1) \\
 &= (0.240)(520) [(100/15)^{2/7} - 1] = 39.8 \text{ Btu/lb}_m
 \end{aligned}$$

2→3, ${}_2q_3 = q_h = 255.8 \text{ Btu/lb}_m$ (由题 7.121 得), ${}_2w_3 = 0$, 因而 $\Delta h = 255.8 \text{ Btu/lb}_m$.

$$3 \rightarrow 4, {}_3q_4 = 0, \quad {}_3w_4 = -w_h = c_p(T_4 - T_3) = c_p T_3 (r_p^{(1-k)/k} - 1) \\ = (0.240)(1960)[(100/15)^{-2/7} - 1] = -196.8 \text{ Btu/lb}_m = \Delta h$$

最后, 4→1,

$${}_4w_1 = 0 \\ \Delta h = c_p(T_1 - T_4) = c_p(T_1 - r_p^{(1-k)/k} T_3) \\ = (0.240)[520 - (100/15)^{-2/7}(1960)] = -148.8 \text{ Btu/lb}_m \\ = {}_4q_1 = -q_c$$

如表 7-30 所示.

表 7-30

状态	$q/(\text{Btu/lb}_m)$	$w/(\text{Btu/lb}_m)$	$\Delta h/(\text{Btu/lb}_m)$
1			
2	0	89.8	89.8
3	255.8	0	255.8
4	0	-196.8	-196.8
1	-148.8	0	-148.8
∮	107.0	-107.0	0.0

7.124^D 将空气视为半理想气体, 重解题 7.120.

解 现在利用表 B2 中的 P_r 值计算 w_h, q_h, w_c . 1→2, $P_{r2} = r_p P_{r1} = 5(2.451) = 12.26$

由插值法得对应的温度为

$$T_2 = 460 + [(12.26 - 11.05)/(12.86 - 11.05)](20) = 473.4 \text{ K}$$

对应的焓为

$$h_2 = 462.2 + (13.4/20)(20.5) = 475.9 \text{ kJ/kg}$$

压缩功

$$w_c = h_2 - h_1 = 475.9 - 300.2 = 175.7 \text{ kJ/kg}$$

进一步得,

$$q_h = h_3 - h_2 = 1047 - 475.9 = 571 \text{ kJ/kg}$$

同理, 3→4,

$$P_{r4} = r_p^{-1} P_{r3} = (1/5)(201.9) = 40.38$$

$$T_4 = 650 + [(40.38 - 38.68)/(50.98 - 38.68)](50) = 656.9 \text{ K}$$

$$h_4 = 660.4 + (6.9/50)(53.4) = 667.8 \text{ kJ/kg}$$

$$w_c = h_3 - h_4 = 1047 - 667.8 = 379 \text{ kJ/kg}$$

所以得

$$(a) \quad \eta = w_{net}/q_h = (w_c - w_s)/q_h = (379 - 176)/571 = 35.6\%$$

$$(b) \quad w_{net} = 203 \text{ kJ/kg}$$

$$(c) \quad w_s/w_c = 176/379 = 46.4\%$$

7.125^D 将空气视为半理想气体, 重解题 7.121.

解 现在利用表 B1 中的 P_r 值计算 w_c, q_h 和 w_s .

1→2,

$$P_{r2} = P_{r1} r_p = (2.140)(100/15) = 14.27$$

由插值法, 得

$$T_2 = 850 + [(14.27 - 11.97)/(14.90 - 11.97)](50) = 889.2^\circ \text{R}$$

$$h_2 = 204.1 + (39.2/50)(12.3) = 213.7 \text{ Btu/lb}_m$$

则

$$w_c = h_2 - h_1 = 213.7 - 124.2 = 89.5 \text{ Btu/lb}_m$$

同理, 对等熵过程 3→4,

$$P_{r4} = P_{r3} r_p^{-1}$$

在 $T_3 = 1960^\circ \text{R}$ 时,

$$h_3 = 477.2 + (60/100)(27.9) = 493.9 \text{ Btu/lb}_m$$

$$P_{r3} = 250.6 + (60/100)(57.2) = 284.9$$

则

$$P_{r4} = (284.9)(15/100) = 42.74$$

$$T_4 = 1200 + [(42.74 - 41.95)/(56.80 - 41.95)](100) = 1205^\circ \text{R}$$

$$h_4 = 291.6 + (5/100)(25.6) = 292.9 \text{ Btu/lb}_m$$

$$w_s = h_3 - h_4 = 493.9 - 292.9 = 201.0 \text{ Btu/lb}_m$$

且

$$q_h = h_3 - h_2 = 493.9 - 213.7 = 280.2 \text{ Btu/lb}_m$$

所以得(a) $\eta = w_{\text{net}}/q_h = (w_a - w_c)/q_h = (201 - 89.5)/280.2 = 39.8\%$

(b) $w_{\text{net}} = 111.5 \text{ Btu/lb}_m$

(c) $w_c/w_a = 89.5/201.0 = 44.5\%$

- 7.126^D 某布雷顿循环在 1bar, 300K 和 5bar, 100K 之间工作, 涡轮压缩机的效率为 80%, 涡轮汽轮机的效率为 85%, 假设空气为理想气体, 计算每千克空气循环的净功(kJ/kg).

解 如图 7-26. 压缩过程的实际路线为从 1 到 2a, 膨胀过程的实际路线为从 3 到 4a, 在这两个过程中熵增加. 压缩机的等熵效率定义为

$$\eta_c = \frac{w_{2a}}{w_{c,a}} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_{2a} - T_1}$$

同理, 汽轮机等熵效率

$$\eta_t = \frac{w_a}{w_s} = \frac{T_{3s} - T_4}{T_{3s} - T_{4s}}$$

图 7-26

由题 7.120 得等熵过程中的有关数据, $w_{2s} = 176.0 \text{ kJ/kg}$. 如果 $\eta_c = 0.80$, 那么 $w_{2a} = w_{2s}/\eta_c = 176.0/0.80 = 220.0 \text{ kJ/kg}$. 又 $w_s = 370.5 \text{ kJ}$, $\eta_t = 0.85$, 则 $w_a = \eta_t w_s = (0.85)(370.5) = 314.9 \text{ kJ/kg}$. 压缩机需要的功更多, 汽轮机输出的功更小. 循环净功为 $314.9 - 220.0 = 94.9 \text{ kJ/kg}$.

- 7.127 某布雷顿循环在 15psia, 60°F 和 100psia, 1500°F 之间工作, 涡轮压缩机的效率为 80%, 涡轮汽轮机的效率为 85%, 如果空气是理想气体, 计算每循环净功(Btu/lb_m).

解 利用题 7.126 中公式, 并由 7.121 收集等熵情况下的数据, 得 $w_{2s} = 89.8 \text{ Btu/lb}_m$, $\eta_c = 0.80$, 则

$$w_{2a} = w_{2s}/\eta_c = 89.8/0.8 = 112.3 \text{ Btu/lb}_m$$

又 $w_s = 196.8 \text{ Btu/lb}_m$, $\eta_t = 0.85$, 则

$$w_a = \eta_t w_s = (0.85)(196.8) = 167.3 \text{ Btu/lb}_m$$

因此,

$$w_{\text{net}} = w_a - w_{2a} = 167.3 - 112.3 = 55.0 \text{ Btu/lb}_m$$

- 7.128^D 如果空气为半理想气体, 重解题 7.126.

解 现在效率公式是

$$\eta_c = \frac{w_{2a}}{w_{c,a}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \quad \eta_t = \frac{W_a}{W_s} = \frac{h_{3s} - h_4}{h_{3s} - h_{4s}}$$

从题 7.124 中收集等熵情况下的有关数据, $w_{2s} = 175.7 \text{ kJ/kg}$, $\eta_c = 0.80$, 则

$$w_{2a} = w_{2s}/\eta_c = 175.7/0.80 = 219.6 \text{ kJ/kg}$$

且 $w_s = 379 \text{ kJ/kg}$, $\eta_t = 0.85$, 则

$$w_a = \eta_t w_s = (0.85)(379) = 322 \text{ kJ/kg}$$

每千克空气循环净功为

$$322 - 220 = 102 \text{ kJ/kg}$$

- 7.129^D 将空气视为半理想气体, 重解题 7.127.

解 利用题 7.128 中公式, 从题 7.125 中收集等熵情况的数据, $w_{2s} = 89.5 \text{ Btu/lb}_m$, $\eta_c = 0.80$, 因而

$$w_{2a} = w_{2s}/\eta_c = 89.5/0.80 = 111.9 \text{ Btu/lb}_m$$

又 $w_s = 201.0 \text{ Btu/lb}_m$, $\eta_t = 0.85$, 则

$$w_a = \eta_t w_s = (0.85)(201.0) = 170.9 \text{ Btu/lb}_m$$

则

$$w_{\text{net}} = w_a - w_{2a} = 170.9 - 111.9 = 59.0 \text{ Btu/lb}_m$$

- 7.130^D 求题 7.126 循环中的温度 T_{2a} 和 T_{4a} , 并计算 q_c 和 q_h , 与题 7.126 的结果比较, 检验 $q_h - q_c$ 是否正确.

解 由 $w_{2a} = c_p(T_{2a} - T_1)$,

$$T_{2a} = (w_{2a}/c_p) + T_1 = (220.0/1.005) + 300 = 518.9 \text{ K}$$

得

$$q_h = c_p(T_3 - T_{2a}) = (1.005)(1000 - 518.9) = 483.5 \text{ kJ/kg}$$

同理,

$$T_{4a} = T_3 - (w_a/c_p) = 1000 - (314.9/1.005) = 686.7 \text{ K}$$

$$\text{则 } q_1 = c_p(T_{3a} - T_1) = (1.005)(686.7 - 300) = 388.6 \text{ kJ/kg}$$

则有 $q_h - q_c = 94.9 \text{ kJ/kg}$, 这和前面一致。

- 7.131^D 求题 7.127 循环中的温度 T_{2a} 和 T_{4a} , 并计算 q_c 和 q_h . 与题 7.127 的结果对比, 检验 $q_h - q_c$ 是否正确。

$$\text{解 } \text{由 } w_{c,a} = c_p(T_{2a} - T_1), T_{2a} = (w_{c,a}/c_p) + T_1 = (112.3/0.240) + 520 = 988^\circ\text{R}$$

$$\text{得 } q_h = c_p(T_3 - T_{2a}) = (0.240)(1960 - 988) = 233 \text{ Btu/lbm}$$

$$\text{同理 } T_{4a} = T_3 - (w_{m,a}/c_p) = 1960 - (167.3/0.240) = 1263^\circ\text{R}$$

$$\text{则 } q_c = c_p(T_{4a} - T_1) = (0.240)(1263 - 520) = 178 \text{ Btu/lbm}$$

则有 $q_h - q_c = 233 - 178 = 55 \text{ Btu/lbm}$, 与前面一致。

- 7.132 参看题 7.120 和 7.126, 如果现在吸收的热量(实际上指燃料放出的热量)为常数 $Q_h = 500 \text{ kJ}$, 那么输出净功将如何变化? 变化多少?

解 在题 7.120 中, 各个部件的效率为 100%, 求得 $q_h = 527.5 \text{ kJ/kg}$ 空气。

现在 $Q_h = 500 \text{ kJ}$, 则循环的工质空气的质量为 $300/527.5 = 0.9479$. 净输出功为 $(0.9479)(194.5) = 184 \text{ kJ}$.

在题 7.126 中, 部件效率较低, 实际压缩功 $w_{c,a} = 220.0 \text{ kJ/kg}$, 因为点 3 固定[周围温度受汽轮机叶片限制], 增加压缩功会使得燃烧过程所需能量减小, 压缩功从原来等熵即理想情况下的 176.0 kJ/kg 空气增加到不可逆即实际情况下的 220.0 kJ/kg 空气, 所以需要热量减少 44.0 kJ/kg . [可以检验, 在题 7.130 中, $q_h = 483.5 \text{ kJ/kg}$, 而在题 7.120 中, $q_h = 527.5 \text{ kJ/kg}$] 因此需加热量 483.5 kJ/kg . 而需要提供 500 kJ 的空气质量为 $500/483.5 = 1.0341 \text{ kg}$. 因而净输出功为 $(1.0341)(94.9) = 98.1 \text{ kJ}$.

- 7.133^D 以理想空气为工质的某布雷顿循环在 1 bar , 300 K 和 5 bar , 1000 K 之间工作, 假设涡轮压缩机与涡轮汽轮机的效率相等, 当等熵效率为多少时每千克空气循环的输出功为 100 kJ/kg 空气?

解 在题 7.122 中, 已经分析了各部件效率为 100% 的理想循环, 那里等熵压缩功为 176.0 kJ/kg , 等熵膨胀功为 370.5 kJ/kg . 设两个部件的定熵效率都为 η , $w_{\text{net}} = w_m - w_c = \eta w_m - w_c/\eta$. 代入数据, 得

$$\eta^2 - 0.26991\eta - 0.47503 = 0$$

$$\text{则 } \eta = 0.8373 = 83.7\%$$

- 7.134^D 将空气视为半理想气体, 重解题 7.133.

解 由题 7.126 所得 w_m 和 w_c , 有

$$100 = \eta(379.0) - (175.7/\eta)$$

$$\text{即 } \eta^2 - 0.26385\eta - 0.46359 = 0$$

$$\text{则 } \eta = 0.8255 = 82.6\%$$

- 7.135^D 以理想空气为工质的某布雷顿循环在 15 psia , 60°F 和 100 psia , 1500°F 之间工作, 压缩机和汽轮机的效率相等, 问当每循环的输出净功为 75 Btu/lbm 时, 它们的效率是多少?

解 由题 7.121, 得 $w_c = 89.8 \text{ Btu/lbm}$, $w_m = 196.8 \text{ Btu/lbm}$. 两个部件的效率为 η 时,

$$w_{\text{net}} = w_m/\eta - w_c = 89.8/\eta, w_m = \eta w_m = 196.8\eta$$

$$\text{因此 } w_{\text{net}} = 75 \text{ Btu/lbm} = 196.8\eta - 89.8/\eta$$

$$\text{即 } \eta^2 - 0.3810\eta - 0.45630 = 0$$

$$\text{则 } \eta = 89.2\%$$

- 7.136^D 将空气视为半理想气体, 重解题 7.135.

解 由题 7.125 中的 w_m 和 w_c , 得

$$75 = 201.0\eta - 89.5/\eta$$

$$\text{则 } \eta^2 - 0.37313\eta - 0.44527 = 0$$

$$\eta = 0.8795 = 88.0\%$$

7. 137^D 以理想空气为工质的某布雷顿循环在 1bar, 300K 和 5bar, 1000K 之间工作。[在题 7. 120 中已得输出净功为 194. 5kJ/kg]若你让此循环运行, 使净输出功慢慢减少一直减少到零为止, 你会发现因为氧化、腐蚀等原因, 涡轮压缩机和涡轮汽轮机的效率减小了相同的数值(%), 请判断是否正确。

解 净输出功为零时, 涡轮汽轮机输出的功必需全部用来驱动涡轮压缩机, 由题 7. 126 知涡轮汽轮机的输出功为 ηw_a , 由题 7. 120 知 $w_a = 370. 5 \text{ kJ/kg}$, 因此当涡轮汽轮机的效率为 η 时它的输出功为 $370. 5\eta$ 由题 7. 126 知涡轮压缩机需要的功为 w_c/η , 由题 7. 122 知 $w_c = 176. 0 \text{ kJ/kg}$, 因此, 若涡轮压缩机的效率为 η , 它所需要的功为 $176. 0/\eta$ 这两个功数值相等, $370. 5\eta = 176. 0/\eta$, 因而

$$\eta = 0. 6892 = 68. 9\%$$

7. 138^D 若空气为半理想气体, 重解题 7. 137.

解 由题 7. 124 得 w_c 和 w_a , 则

$$379\eta = 175. 7/\eta \quad \text{因而} \quad \eta = 0. 6809 = 68. 1\%$$

7. 139^D 以理想空气为工质的某布雷顿循环在 15psia, 60°F 和 100psia, 1500°F 之间工作, 由于腐蚀等原因, 压缩机和汽轮机的效率越来越低, 直到有一天净输出功为零, 此时的最小效率为多少?

解 净输出功为零时, 涡轮汽轮机输出功必须全部用来驱动压缩机, 由题 7. 126 知, 涡轮汽轮机的输出功为 ηw_a , 且由题 7. 121 知 $w_a = 196. 8 \text{ Btu/lb}_m$, 因此涡轮汽轮机的输出功为 $196. 8\eta$, 由题 7. 126 知, 压缩机消耗的功为 w_c/η , 且由题 7. 121 知 $w_c = 89. 8 \text{ Btu/lb}_m$, 这两个功数值相等,

$$196. 8\eta = 89. 8/\eta \quad \text{因而} \quad \eta = 0. 67550 = 67. 6\%$$

7. 140^D 若空气为半理想气体, 重解题 7. 139.

解 由题 7. 125 可知 w_c 和 w_a , 则

$$201. 0\eta = 89. 5/\eta \quad \text{则} \quad \eta = 0. 66729 = 66. 7\%$$

7. 141^D 以半理想空气为工质的某布雷顿循环在初始状态(1bar, 300K)和循环中体积最大状态(5bar, 1000K)之间工作, 假设各个部件的效率为 100%, 利用表中的熵参数 s° , 计算: (a) 压缩机消耗的功(kJ/kg); (b) 净功(kJ/kg); (c) 燃烧时释放出的热量(kJ/kg).

解 对于半理想气体, 回忆(题 2. 90)得

$$s_f - s_i = (s_f^\circ - s_i^\circ) - R \ln(P_f/P_i)$$

(a) 利用图 7-25 中的标号, 则有

对于等熵过程 1→2 ($P_1 = 1 \text{ bar}$),

$$s_2^\circ - s_1^\circ + R \ln(P_2/P_1) = 6. 867 + 0. 287 \ln 5 = 7. 329 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

现在根据空气表反向内插得

$$T_2 = 460 + [(7. 329 - 7. 290)/(7. 343 - 7. 290)](20) = 474. 7 \text{ K}$$

在此 $h_2 = 462. 2 + (14. 7/20. 5) = 477. 3 \text{ kJ/kg}$.

压缩功的理想值为

$$w_{cs} = h_2 - h_1 = 477. 3 - 300. 2 = 177. 1 \text{ kJ/kg}$$

同理, 对于等熵过程 3→4,

$$s_4^\circ - s_3^\circ + R \ln(P_4/P_3) = 8. 133 + 0. 287 \ln(1/5) = 7. 671$$

$$T_4 = 648 \text{ K} \quad h_4 = 658. 3 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{as} = h_3 - h_4 = 1047 - 658 = 389 \text{ kJ/kg}$$

(b)

$$w_{net} = w_a - w_c = 389 - 177 = 212 \text{ kJ/kg}$$

(c)

$$q_h = h_3 - h_2 = 1047 - 477 = 570 \text{ kJ/kg}$$

[可以将这些结果与由题 7. 124 的结果作比较, 那里得到 $w_{cs} = 175. 7 \text{ kJ/kg}$, $w_{net} = 203 \text{ kJ/kg}$, $q_h = 570 \text{ kJ/kg}$]

7. 142^D 以半理想空气为工质的一布雷顿循环在 15psia, 60°F 和 100psia, 1500°F 之间工作, 压缩机和汽轮机的效率都是 100%, 利用表中熵参数 s° , 计算: (a) 循环的净输出功

(Btu/lb_m); (b) 热效率(%).

解 (a) 对于半理想气体, 回忆(题 2.90)有

$$s_f - s_i = (s_f^0 - s_i^0) - R \ln(P_f/P_i)$$

对于等熵过程 1→2(图 7-25)来说,

$$s_2^0 = s_1^0 + R \ln(P_2/P_1) = 1.6311 + 0.06856 \ln(100/15) \\ = 1.7612 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

因此 $T_2 = 850 + [(1.7612 - 1.7491)/(1.7642 - 1.7491)](50) = 890.1^\circ\text{R}$

在此温度时 $h_2 = 204.1 + (40.1/50)(12.3) = 214.0 \text{ Btu/lb}_m$

$$w_{12} = h_2 - h_1 = 214.0 - 124.2 = 89.8 \text{ Btu/lb}_m$$

同理, 在膨胀过程 3→4 中, $s_4^0 = s_3^0 + R \ln(P_4/P_3)$.

由表 B1 知, 在 $T_3 = 1960^\circ\text{R}$ 时, $s_3^0 = 1.958 + (60/100)(0.014) = 1.966 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 因而 $s_4 = 1.966 + 0.06856 \ln(15/100) = 1.836 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$

$$T_4 = 1100 + [(1.836 - 1.815)/(1.838 - 1.815)](100) = 1191^\circ\text{R}$$

$$h_4 = 266.2 + (91/100)(25.4) = 289.3 \text{ Btu/lb}_m$$

$$w_{34} = h_3 - h_4 = 493.9 - 289.3 = 204.6 \text{ Btu/lb}_m$$

则 $w_{\text{net}} = w_{34} - w_{12} = 204.6 - 89.8 = 114.8 \text{ Btu/lb}_m$

(b) $q_h - h_3 - h_2 = 493.9 - 214.0 = 279.9 \text{ Btu/lb}_m$

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = 114.8/279.9 = 0.4101 = 41.0\%$$

[可以将这些结果和由题 7.125 得到的结果做一个比较, 那里的结果为 $w_{12} = 89.5 \text{ Btu/lb}_m$, $w_{34} = 201.0 \text{ Btu/lb}_m$, $q_h = 280.2 \text{ Btu/lb}_m$, $\eta = 39.8\%$.]

- 7.143** 某理想气体从压强和温度分别为 P_1 和 T_1 的状态等熵压缩到压强为 P_2 . 当压强为 P_x 时, 停止压缩, 气体冷却后又回到 T_1 , 然后继续压缩达 P_2 , 计算总压缩功最小时所对应的中间压强 P_x .

解 设第一次压缩后温度为 T_x , 那么 $w_1 = c_p(T_x - T_1)$, 同理, 设第二次压缩后温度为 T_2 , $w_2 = c_p(T_2 - T_1)$. 相加, 得

$$w = w_1 + w_2 = c_p T_1 \left(\frac{T_x}{T_1} - 1 + \frac{T_2}{T_1} - 1 \right)$$

但 $T_x/T_1 = (P_x/P_1)^{(k-1)/k}$, $T_2/T_1 = (P_2/P_x)^{(k-1)/k}$, 下面的问题是使下式最小

$$F(P_x) = (P_x/P_1)^{(k-1)/k} + (P_2/P_x)^{(k-1)/k}$$

$F'(P_x) = 0$, 求解得 $P_x = \sqrt{P_1 P_2}$.

- 7.144** 通过求出最好的两个中间压强 P_x 和 P_y 将题 7.143 推广.

解 不要用积分! 看图 7-27, 注意不管最佳的 P_x 是什么, P_y 一定是与末态条件 P_2 和 P_2 有关的最佳值. [这是动力学过程的原理]. 因此, 由题 7.143 得

$$P_y = P_x^{1/2} P_2^{1/2} \quad (1)$$

但是, 整个过程都可逆, 同理得

$$P_x = P_y^{1/2} P_1^{1/2} \quad (2)$$

同时求解式(1)和(2), 得 $P_x = P_1^{2/3} P_2^{1/3}$ 和 $P_y = P_1^{1/3} P_2^{2/3}$.

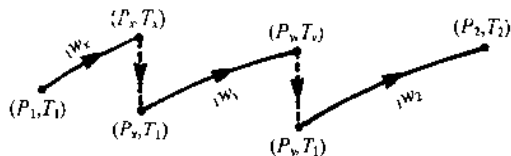


图 7-27

- 7.145^D** 以理想空气为工质的某布雷顿循环在 1bar, 300K 和 5bar, 1000K 之间工作. 空气分两个阶段压缩: 第一次压缩至最理想的级间压强(题 7.143), 后空气冷却至初始温度, 然后压缩到 5bar. 类似地, 在涡轮汽轮机中, 第一次膨胀至最佳级间压强后, 空气吸热回到原压

强,然后膨胀至 1bar. (a)最佳级间压强是多少(bar)? (b)净输出功是多少(kJ/kg 空气)? (c)必须将涡轮汽轮机输出功的百分之多少输入给涡轮压缩机?

解 (a)利用图 7-28 中的标号,最佳级间压强为

$$P_i = \sqrt{P_1 P_4} = \sqrt{(1)(5)} = 2.236 \text{ bar}$$

这是中间冷却和回热的最佳压强.

(b)净输出功为

$$|{}_5w_6 + {}_7w_8 + {}_1w_2 + {}_3w_4|$$

在点 5,

$$P_5 = 5 \text{ bar} \quad T_5 = 1000 \text{ K}$$

在点 6,

$$P_6 = 2.236 \text{ bar}$$

$$T_6 = T_5 (P_6/P_5)^{(k-1)/k} = (1000)(2.236/5)^{0.4/1.4} = 794.6 \text{ K}$$

因而,

$${}_5w_6 = c_p(T_6 - T_5) = (1.005)(794.6 - 1000) = -206.4 \text{ kJ/kg}$$

7→8,

$$P_7 = \sqrt{5} \text{ bar} \quad T_7 = 1000 \text{ K}$$

在点 8,

$$P_8 = 1 \text{ bar}, T_8 = T_7 (P_8/P_7)^{(k-1)/k} = (1000)(1/\sqrt{5})^{2/7} = 794.60 \text{ K}$$

因此,

$${}_7w_8 = c_p(T_8 - T_7) = (1.005)(794.6 - 1000) = -206.4 \text{ kJ/kg} = {}_5w_6$$

类似地得

$${}_1w_2 = {}_3w_4 = 77.9 \text{ kJ/kg}$$

因此,

$$w_{\text{net}} = 2(206.4 - 77.9) = 257 \text{ kJ/kg}$$

(c)压缩过程需要的功占输出功的百分比为

$$155.8/412.8 = 0.3774 = 37.7\%$$

将此结果与由题 7.120 得到的结果(47.5%)比较表明,这里的百分比大大降低.

7.146^D

以理想空气为工质的一布雷顿循环在 15psia, 60°F 和 100psia, 1500°F 之间工作, 空气分两阶段压缩: 第一次压缩至最佳级间压强(题 7.143)后空气冷却回到初始温度, 然后再压缩至 100psia. 类似地, 在涡轮汽轮机中, 第一次膨胀至最佳级间压强后又加热回到原始温度, 然后又膨胀至 15psia. (a)理想的级间压强是多少(psia)? (b)净输出功是多少(Btu/lb_m 空气)? (c)必须将由涡轮汽轮机输出功的百分之多少输入给涡轮压缩机?

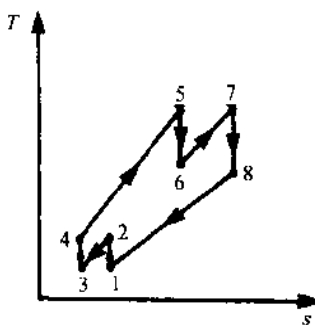


图 7-28

解 (a)根据图 7-28 中的标号,最佳级间压强为

$$P_i = \sqrt{P_1 P_4} = \sqrt{(15)(100)} = 38.73 \text{ psia}$$

这是中间冷却和再热的最佳压强.

(b)净输出功是

$$|{}_5w_6 + {}_7w_8 + {}_1w_2 + {}_3w_4|$$

在点 5,

$$P_5 = 100 \text{ psia}, \quad T_5 = 1960^\circ \text{R}$$

在点 6,

$$P_6 = 38.73 \text{ psia}$$

$$T_6 = T_5 (P_6/P_5)^{(k-1)/k} = (1960)(38.73/100)^{0.4/1.4} = 1495^\circ \text{R}$$

因而,

$${}_5w_6 = c_p(T_6 - T_5) = (0.240)(1495 - 1960) = -111.6 \text{ Btu/lb}_m$$

7→8,

$$P_7 = 38.73 \text{ psia}, \quad T_7 = 1960^\circ \text{R}$$

在点 8,

$$P_8 = 15 \text{ psia}$$

$$T_8 = T_7 (P_8/P_7)^{(k-1)/k} = (1960)(1/2.582)^{2/7} = 1495^\circ \text{R}$$

因此,

$${}_7w_8 = c_p(T_8 - T_7) = (0.240)(1495 - 1960) = -111.6 \text{ Btu/lb}_m = {}_5w_6$$

同理得

$${}_1w_2 = {}_3w_4 = 38.88 \text{ Btu/lb}_m$$

因此

$$w_{\text{net}} = 2(111.6 - 38.88) = 145.4 \text{ Btu/lb}_m$$

(c)压缩机消耗的功占输出功的百分比为

$$77.8/223.2 = 0.3486 = 34.9\%$$

与题 7.123 的结果(45.6%)比较表明,多级压缩和多级膨胀的循环的百分比明显减小.

7.147^D

空气视为半理想气体,重解题 7.145.

解 对于非理想气体来讲,可用题 7.143 的结果近似求解(近似程度较好).

(a)利用图 7-28 的记号,最佳级间压强为

$$P_1 = \sqrt{P_1 P_4} = \sqrt{5} \text{ bar}$$

这是中间冷却和再热的最佳压强。

(b) 净输出功为

$$|{}_3w_6 + {}_7w_8 + {}_1w_2 + {}_3w_4|$$

在点 5,

$$P_5 = 5 \text{ bar} \quad T_5 = 1000 \text{ K}$$

在点 6, $P_6 = \sqrt{5} \text{ bar}$, $P_{r6} = P_{r5} (P_6/P_5) = (201.9)(\sqrt{5}/5) = 90.29$ 。与此减小了的压强对应的温度为

$$T_6 = 800 + [(90.29 - 84.51)/(106.69 - 84.51)](50) = 813.0 \text{ K}$$

且

$$822.5 + (13/50)(55.3) = 836.9 \text{ kJ/kg}$$

则

$${}_5w_6 = h_6 - h_5 = 836.9 - 1047 = -210 \text{ kJ/kg}$$

在膨胀过程 7→8 中,

$$P_{r8} = P_{r7} (P_8/P_7) = P_{r1} (P_1/P_6) = P_{r5} (P_6/P_5) = P_{r6} = 90.29$$

因此空气第二次膨胀后的压强为 1 bar, 温度和焓与第一次膨胀至 2.236 bar 后的温度和焓相同, 则

$${}_7w_8 = {}_5w_6 = -210 \text{ kJ/kg}$$

同理, 压缩功为

$${}_1w_2 = {}_3w_4 = 77.9 \text{ kJ/kg}$$

因此,

$$w_{\text{net}} = -2(210 - 77.9) = 264 \text{ kJ/kg}$$

(c) 压缩机消耗的功占输出功的百分比为

$$155.8/420 = 0.3710 = 37.1\%$$

在布雷顿循环中采用多级压缩和多级膨胀导致此结果明显减小。

7.148^D 空气视为半理想气体, 重解题 7.146.

解 对于非理想气体来讲, 可用题 7.143 的结果作为(很好的)近似解法。

(a) 利用图 7-28 的记号, 最佳级间压强为

$$P_1 = \sqrt{P_1 P_4} = \sqrt{15(100)} = 38.73 \text{ psia}$$

这是中间冷却和再热的最佳压强。

(b) 净输出功为

$$|{}_3w_6 + {}_7w_8 + {}_1w_2 + {}_3w_4|$$

在点 5,

$$P_5 = 100 \text{ psia}, \quad T_5 = 1960^\circ \text{R}$$

$$P_{r5} = 250.6 + (0.6)(57.2) = 284.9$$

在点 6,

$$P_6 = 38.73 \text{ psia}$$

$$P_{r6} = P_{r5} (P_6/P_5) = (284.9)(38.73/100) = 110.3$$

则 $T_6 = 1500 + [(110.3 - 98.9)/(127.0 - 98.9)](100) = 1541^\circ \text{R}$

在此温度时,

$$h_6 = 380.4 \text{ Btu/lbm}$$

因而

$${}_5w_6 = h_6 - h_5 = 380.4 - 493.9 = -113.5 \text{ Btu/lbm}$$

在第二次膨胀 7→8 中,

$$P_{r8} = P_{r7} (P_8/P_7) = P_{r5} (P_1/P_6) = P_{r5} (P_6/P_5) = P_{r6} = 110.3$$

则

$${}_7w_8 = {}_5w_6 = -113.5 \text{ Btu/lbm}$$

同理, 压缩机需要的功为

$${}_1w_2 = {}_3w_4 = 38.8 \text{ Btu/lbm}$$

因此

$$w_{\text{net}} = 2(113.5 - 38.8) = 149.4 \text{ Btu/lbm}$$

(c) 压缩机消耗的功占输出功的百分比为

$$77.6/227.0 = 0.3419 = 34.2\%$$

7.149^D 如果两个压缩机的等熵效率都是 80%, 两个汽轮机的等熵效率都是 85%, 再解题 7.145.

解 (a) 和前面一样, $P_1 = \sqrt{5} \text{ bar}$.

(b) 在题 7.145 中, 从 5 到 $\sqrt{5} \text{ bar}$ 和从 $\sqrt{5}$ 到 1 bar 的两次膨胀中, 每次产生的功都为 $w_m = 206.4 \text{ kJ/kg}$. 汽轮机的效率较低时, 输出功减为

$$w_m = \eta w_{m0} = (0.85)(206.4) = 175.4 \text{ kJ/kg}$$

同样, 在理想情况下, 每次压缩消耗功为 $w_{01} = 77.9 \text{ kJ/kg}$

而在实际情况下, 为

$$w_m = w_{01} / \eta = 77.9680 = 97.4 \text{ kJ/kg}$$

因此,

$$w_{\text{net}} = 2(175.4 - 97.4) = 156 \text{ kJ/kg}$$

(c) 压缩消耗功占输出功的比例为

$$194.8/350.8 = 0.5553 = 55.5\%$$

- 7.150^D 如果两个压缩机的等熵效率都是 80%，两个汽轮机的等熵效率都是 85%，再解题 7.146.

解 (a) 和前面一样, $P_1 = 38.73 \text{ psia}$.

(b) 在题 7.146 中, 从 100 psia 到 38.73 psia 和从 38.73 psia 到 15 psia 的两次膨胀中, 每次产生的功都为 111.6 Btu/lb_m. 汽轮机的效率较低时, 输出功减为 $(0.85)(111.6) = 94.9 \text{ Btu/lb}_m$. 同样, 在理想情况下, 每次压缩消耗功为 38.9 Btu/lb_m. 在效率低时, 消耗功增加为 $38.9/0.80 = 48.6 \text{ Btu/lb}_m$. 因此, $w_{\text{net}} = 2(94.9 - 48.6) = 92.6 \text{ Btu/lb}_m$.

(c) 压缩消耗功占输出功的比例为 $97.2/189.8 = 0.5121 = 51.2\%$.

- 7.151^D 空气视为半理想气体, 重解题到 7.149, 空气分两级压缩——第一次压缩至最佳级间压强后空气冷却回初始温度, 然后压缩至 5 bar, 两个压缩机的等熵效率都是 80%. 类似, 在膨胀过程中, 首先膨胀至最佳级间压强后再加热至最高温度, 然后又膨胀至 1 bar, 两个压缩机的效率都是 85%. (利用空气表求解)

解 (a) $P_1 \approx \sqrt{5} \text{ bar}$ (见题 7.147).

(b) 在题 7.147 中已得从 5 到 $\sqrt{5} \text{ bar}$ 和从 $\sqrt{5}$ 到 1 bar 的两个膨胀过程各自输出功都为

$$w_s = 210 \text{ kJ/kg}$$

现在汽轮机效率较低, 每次输出功减小到

$$w_a = \eta w_s = (0.85)(210) = 178.5 \text{ kJ/kg}$$

同理, 每个理想压缩机消耗的功为 $w_s = 77.9 \text{ kJ/kg}$

因而每个实际压缩机需要的功为 $w_m = w_s/\eta = 77.9/0.80 = 97.4 \text{ kJ/kg}$

因此 $w_{\text{net}} = 2(178.5 - 97.4) = 162 \text{ kJ/kg}$

(c) 压缩功占的比例为 $(94.8/35) = 0.5457 = 54.6\%$.

- 7.152^D 空气视为半理想气体, 重解题 7.150.

解 (a) $P_1 \approx 38.73 \text{ psia}$ (见题 7.148).

(b) 在题 7.148 已知从 100 psia 到 38.73 psia 和从 38.73 psia 到 15 psia 的两次膨胀过程各自产生的功都是 $w_s = 113.5 \text{ Btu/lb}_m$, 现在汽轮机效率较低, 因此每次输出功减少到 $w_a = \eta w_s = (0.85)(113.5) = 96.5 \text{ Btu/lb}_m$.

同理, 每个理想压缩机消耗功 $w_s = 38.8 \text{ Btu/lb}_m$, 因而每个实际压缩机需要的功为 $w_m = w_s/\eta = 38.8/0.80 = 48.5 \text{ Btu/lb}_m$. 因此 $w_{\text{net}} = 2(96.5 - 48.5) = 96.0 \text{ Btu/lb}_m$.

(c) 压缩功占的比例 $= 97.0/193.0 = 0.5026 = 50.3\%$.

- 7.153 图 7-29 是燃气轮机所需要的设备示意图, 进入压缩机空气 (理想气体) 的压强为 1 bar, 温度为 300 K, 如果压缩机的压强比为 3:1, 燃气轮机内气体的温度为 900 K, 计

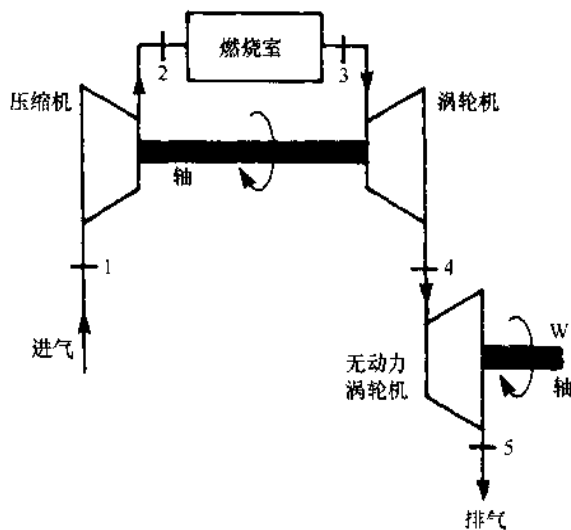


图 7-29

算这种无动力涡轮机的输出功. 假设膨胀和压缩都是等熵过程.

解 前面的问题和这里有一点不一样, 那就是没有具体指出功是如何从汽轮机传到压缩机的, 假设各个部件的效率为 100%, 定熵压缩功为 $w_c = c_p(T_2 - T_1)$, 这里, 对于可逆绝热过程来说,

$$T_2 = T_1(P_2/P_1)^{(k-1)/k} = (300)(3^{2/7}) = 410.6\text{K}$$

因而

$$w_c = (1.005)(410.6 - 300) = 111.2\text{kJ/kg}$$

忽略机械转动(轴)中损失的功, 则压缩过程需要的功 111.2kJ/kg 刚好与第一个涡轮机中的功相等, 因此,

$$111.2 = (1.005)(900 - T_4) \quad \text{则} \quad T_4 = 789.4\text{K}$$

现在空气在无动力涡轮机中膨胀后排出时的压强为 1bar, 因为我们不知道从无动力涡轮机中排出空气的温度, 下面应用两个涡轮机中压强-温度比来求, 对于可逆绝热过程, 从 3→4,

$$P_4 = P_3(T_4/T_3)^{k/(k-1)} = (3)(789.4/900)^{7/2} = 1.8953\text{bar}$$

4→5,

$$T_5 = T_4(P_1/P_4)^{(k-1)/k} = (789.4)(1/1.8953)^{2/7} = 657.6\text{K}$$

因此, $w_s = c_p(T_5 - T_4) = (1.005)(657.6 - 789.4) = -132\text{kJ/kg}$. 即输出功为 132kJ/kg.

- 7.154** 如果设计了一个布雷顿循环, 此循环在 1bar, 300K 和 5bar, 1250K 之间工作. 这里采用两级压缩, 两级膨胀. 第一次膨胀输出的功推动两个压缩机工作, 压缩过程的级间压强为最佳值. 由于腐蚀等原因, 压缩机的实际效率为等熵效率的 85%, 涡轮机的实际效率为等熵效率的 90%, 问输出净功比原始值减小多少(kJ/kg 空气)? 假设空气为理想气体.

解 由图 7-28, 在初始设计中, 最佳级间压强为 $\sqrt{5} = 2.236\text{bar}$, 因而第一次压缩后温度为

$$T_2 = T_1(P_2/P_1)^{(k-1)/k} = (300)(\sqrt{5})^{2/7} = 377.6\text{K}$$

则每个压缩阶段的压缩功为 $\Delta h = c_p \Delta T = (1.005)(377.6 - 300) = 77.94\text{kJ/kg}$

因为涡轮机推动两次压缩, 则

$$w_m = 2(77.94) = 155.88\text{kJ/kg}$$

这些功由第一次膨胀提供, 则

$$w_t = 155.88 = (1.005)(1250 - T_6)$$

则

$$T_6 = 1095\text{K}$$

在此温度下,

$$P_6 = P_5(T_6/T_5)^{k/(k-1)} = 5(1095/1250)^{1.4/0.4} = 3.146\text{bar}$$

压强 3.146bar 与 1bar 不等则驱动了无动力涡轮机.

无动力涡轮机出口处的温度为

$$T_7 = T_6(P_1/P_6)^{(k-1)/k} = (1095)(1/3.146)^{2/7} = 789.2\text{K}$$

则输出功为

$$(1.005)(1095 - 789) = 308\text{kJ/kg}$$

因为各部件腐蚀, 所以输入功必须为

$$2(77.94/0.85) = 183.4\text{kJ/kg}$$

因为这是第一个涡轮机的实际输出功, 所以

$$183.4 = 0.9w_{ts} \quad \text{则} \quad w_{ts} = 203.8\text{kJ/kg}$$

由此得实际的 $\Delta T = 203.8/1.005 = 202.8\text{K}$, 所以

$$T_{6a} = 1250 - 202.8 = 1047.2\text{K}$$

在第一个涡轮机中当温度由 1250K 降低到 1047.2K 时压强由 5bar 降到 P_1 , 因此,

$$P_1 = 5(1047.2/1250)^{3.5} = 2.691\text{bar}$$

在无动力涡轮机中压强由 2.691bar 降到 1bar; 如果各部件效率为 100%, 则出口处的温度为

$$(1047.2)(1/2.691)^{2/7} = 789.2\text{K}$$

等熵输出功为

$$(1.005)(1047.2 - 789.2) = 259.3\text{kJ/kg}$$

实际输出功则为

$$w_{act} = (0.9)(259.3) = 233.4\text{kJ/kg}$$

因此输出功的减少量为 $308 - 233 = 75\text{kJ/kg}$.

- 7.155** 某布雷顿循环吸入的理想空气的压强为 1bar, 温度为 300K, 压缩过程中压强比为

5/1, 最高温度为 1250K, 在涡轮机中膨胀后的热气体经过一回热器, 若压缩机的效率为 85%, 涡轮机的效率为 90%, 回热器的效率为 75%, 计算: (a) 燃料提供的热量 (kJ/kg); (b) 输出净功 (kJ/kg); (c) 空气离开回热器时的温度 (K)。

解 根据图 7-26, 对于可逆绝热过程,

$$T_{2s} = T_1 (P_2/P_1)^{(k-1)/k} = (300)(5^{2/7}) = 475.1 \text{ K}$$

因而

$$w_{1s} = c_p \Delta T_1 = (1.005)(475.1 - 300) = 176.0 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{2s} = w_{1s} / \eta_c = 176.0 / 0.85 = 207.1 \text{ kJ/kg}$$

由此, 得

$$T_{2s} = T_1 + (w_{2s} / c_p) = 300 + (207.1 / 1.005) = 506.1 \text{ K}$$

在膨胀过程中,

$$T_{4s} = T_3 (P_4/P_3)^{(k-1)/k} = (1250)(1/5)^{2/7} = 789.2 \text{ K}$$

因此

$$w_{3s} = (1.005)(1250 - 789.2) = 463.1 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{4s} = \eta_t w_{3s} = (0.90)(463.1) = 416.8 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{4s} - T_3 - (w_{4s} / c_p) = 1250 - (416.8 / 1.005) = 835.3 \text{ K}$$

(a) 燃料提供的能量为

$$q_h = h_3 - h_{2s} = c_p (T_3 - T_{2s}) = (1.005)(1250 - 506.1) = 747.6 \text{ kJ/kg}$$

这是按照前面的方法计算得到的, 但是利用回热器使得此值减小, 因此在 q_h 算出之前必须算入这项, 温度 $T_{4s} = 835.3 \text{ K}$ 的排出热气体比压缩后的温度高 $T_{4s} - T_{2s} = 835.3 - 506.1 = 329.2 \text{ K}$ 。若回热器的效率为 100%, 压缩机排出的气体温度升高值与此相等。因为回热器的效率较低, 实际温度改变 $(0.75)(329.2) = 246.9 \text{ K}$ 。

因此回热器加热由压缩机排出的气体, 使温度由 $T_{2s} = 506.1 \text{ K}$ 升到 $T_2 = 506.1 + 246.9 = 753.0 \text{ K}$ 。

燃料燃烧提供的热量为

$$h_3 - h_2 = c_p (T_3 - T_2) = (1.005)(1250 - 753) = 499.5 \text{ kJ/kg}$$

(b)

$$w_{\text{net}} = w_{3s} - w_{2s} = 416.8 - 207.1 = 209.7 \text{ kJ/kg}$$

(c) 空气离开回热器时的温度为 T_{4s} 减去在回热器中的实际温度改变量, 即 $835.3 - 246.9 = 588.4 \text{ K}$ 。

7.156 利用空气表(半理想气体)重解题 7.155.

解 根据图 7-26 中的标记, 对于等熵过程,

$$P_{r2} = P_{r1} (P_2/P_1) = (2.451)(5) = 12.26$$

因而

$$T_{2s} = 460 + [(12.26 - 11.05) / (12.86 - 11.05)](20) = 473.4 \text{ K}$$

$$h_{2s} = 462.2 + (0.67)(20.5) = 475.9 \text{ kJ/kg}$$

则等熵压缩功为

$$h_{2s} - h_1 = 475.9 - 300.2 = 175.7 \text{ kJ/kg}$$

实际压缩功为

$$w_{2s} = w_{1s} / \eta_c = 175.5 / 0.85 = 206.7 \text{ kJ/kg}$$

对涡轮机作同样的分析得

$$P_{r4} = P_{r3} (P_4/P_3) = 497.5 / 5 = 99.5$$

则

$$T_{4s} = 800 + [(99.5 - 84.5) / (106.7 - 84.5)](50) = 833.8 \text{ K}$$

$$h_{4s} = 822.5 + (33.8/50)(55.3) = 859.9 \text{ kJ/kg}$$

则

$$w_{3s} = h_3 - h_{4s} = 1337 - 859.9 = 477 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{4s} = \eta_t w_{3s} = (0.9)(477) = 429 \text{ kJ/kg}$$

在点 4 的实际焓值为

$$h_4 - w_{4s} = 1337 - 429 = 908 \text{ kJ/kg}$$

若回热器的效率为 100%, 则可达到的最高能量为

$$h_{4s} - h_{2s} = 908 - 506.9 = 401 \text{ kJ/kg}$$

因为实际能量为 $(0.75)(401) = 301 \text{ kJ/kg}$, 压缩机出口处的焓从 507 kJ/kg 增加到 $507 + 301 = 808 \text{ kJ/kg}$ 。

(a) 输入的热量减小到

$$q_h = 1337 - 808 = 529 \text{ kJ/kg}$$

(b)

$$w_{\text{net}} = w_{3s} - w_{2s} = 429 - 207 = 222 \text{ kJ/kg}$$

(c) 因为在回热器内, 焓改变 301 kJ/kg 。在回热器出口处的温度降低, 原值为

$$T_{4s} = 850 + [(908 - 878) / (934 - 878)](50) = 876.8 \text{ K}$$

因为 $h_{4s} = 908 \text{ kJ/kg}$, 所以在回热器出口处 $h_5 = 908 - 301 = 607 \text{ kJ/kg}$, 对应的温度为

$$T_5 = 550 + [(607 - 555.1) / (607.4 - 555.1)](50) = 600 \text{ K}$$

- 7.157 某布雷顿循环的变形如下:空气(理想气体)由压强 P_1 , 温度 T_1 的状态等温压缩到压强为 P_2 , 然后等压(P_2)加热达温度为 T_3 , 接着经等熵膨胀后压强回到初始值 P_1 , 最后经等压冷却后回到初始温度 T_1 . (a) 在 $T-S$ 图上画出这个循环; (b) 证明此循环的效率为

$$\eta = 1 - \frac{\alpha \ln \beta - 1 + \rho \beta^{-\alpha}}{\rho - 1}$$

这里 $\alpha \equiv (k-1)/k$, $\beta \equiv P_2/P_1$, $\rho \equiv T_3/T_2$.

(c) 什么原因使得这个循环不能广泛应用?

解 (a) 看图 7-30, 与布雷顿循环的不同点仅仅是 $1 \rightarrow 2$

为等温压缩过程, 而不是等熵过程.

(b) 根据图 7-30 中的标记, 在等压过程 $4 \rightarrow 1$ 中放出的热量为

$${}_4q_1 = c_p(T_1 - T_4).$$

在等温过程 $1 \rightarrow 2$ 中, ${}_1q_2 = RT_1 \ln(P_1/P_2)$

因而 $q_c = -{}_1q_2 - {}_4q_1 = c_p(T_4 - T_1) + RT_1 \ln(P_2/P_1)$

在等压过程 $2 \rightarrow 3$ 中吸收的热量为 ${}_2q_3 = q_h = c_p(T_3 - T_2)$, 则

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{q_c}{q_h} = 1 - \frac{c_p(T_4 - T_1) + RT_1 \ln(P_2/P_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \\ &= 1 - \frac{(T_4/T_2) - 1 + (\alpha \ln \beta)}{\rho - 1} \end{aligned}$$

[我们用 $c_p T_1 = c_p T_2$ 除分子和分母, 并利用 $R/c_p = (k-1)/k = \alpha$], 而

$$T_4/T_2 = (T_4/T_3)(T_3/T_2) = (P_1/P_2)^{(k-1)/k} (T_3/T_2) = \beta^{-\alpha} \rho$$

代入得证.

(c) 在实际中实现等温压缩很困难.

- 7.158 从下列各方面比较布雷顿循环及题 7.157 中的循环 (a) 热效率; (b) 吸收的热量 (kJ/kg); (c) 输出净功 (kJ/kg). 假设两个循环吸入的空气压强为 1bar, 温度为 300K, 涡轮机入口处压强为 5bar, 温度为 1000K, 并假设各部件都是理想的, 空气为理想气体.

解 在题 7.120 及 7.122 中已经分析了布雷顿循环, 得

$$(a) \quad \eta = 0.3687 = 36.9\%$$

$$(b) \quad q_h = 527.5 \text{ kJ/kg}$$

$$(c) \quad w_{\text{net}} = 194.5 \text{ kJ/kg}$$

对于它的变形, 利用图 7-30 中的标号,

在点 1, $v_1 = 0.8610 \text{ m}^3/\text{kg}$, $P_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = 300 \text{ K}$. 等温压缩到 5bar,

$${}_1w_2 = RT \ln(P_2/P_1) = (0.28704)(300) \ln(5/1) = 138.6 \text{ kJ/kg}$$

空气在 5bar 时温度由 300K 升高到 1000K 吸收的热量为

$$q_h = {}_2q_3 = c_p(T_3 - T_2) = (1.005)(1000 - 300) = 703.5 \text{ kJ/kg}$$

等熵膨胀回 1bar 时, $T_4 = T_3(P_4/P_3)^{(k-1)/k} = (1000)(1/5)^{2/7} = 631.4 \text{ K}$, 因此 ${}_3w_4 = c_p(T_4 - T_3) = (1.005)(631.4 - 1000) = -370.3 \text{ kJ/kg}$. $w_{\text{net}} = |{}_1w_2 + {}_3w_4| = 231.7 \text{ kJ/kg}$, 则

$$(a) \quad \eta = w_{\text{net}}/q_h = 231.7/703.5 = 0.3294 = 32.9\%$$

$$(b) \quad q_h = 703.5 \text{ kJ/kg}$$

$$(c) \quad w_{\text{net}} = 231.7 \text{ kJ/kg}$$

- 7.159 题 7.157 循环中各部件效率为 100%, 空气为理想气体, 在 15psia, 60°F (循环入口处) 与 100psia, 1500°F (在涡轮机入口处) 之间工作, 计算热效率.

解 利用题 7.157(b), 有 $\alpha = (k-1)/k = (1.4-1)/1.4 = 2/7$, $\beta = P_2/P_1 = 100/15$, $\rho = T_3/T_2 = 1960/520$, 则有

$$\eta = 1 - \frac{(2/7) \ln(100/15) - 1 + (1960/520)(100/15)^{-2/7}}{(1960/520) - 1} = 0.374$$

- 7.160 某斯特令循环中空气的初始状态为相对低的压强(P_1)和温度($T_1 = T_c$), 首先等温压

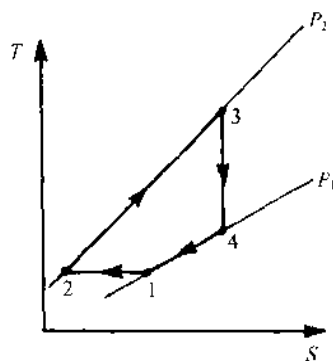


图 7-30

缩空气, 压缩比为 $r \equiv v_1/v_2$, 然后空气通过一个回热器, 等容吸热达到压强和温度最大 (P_3 和 $T_3 = T_h$). 接着空气等温膨胀到初始体积, 最后回热冷却回初始点. (a) 分别在 $P-V$ 及 $T-S$ 图上画出这个循环; (b) 列表表示循环中各状态的 P, V 和 T . 假设空气为理想气体.

解 (a) 见图 7-31.

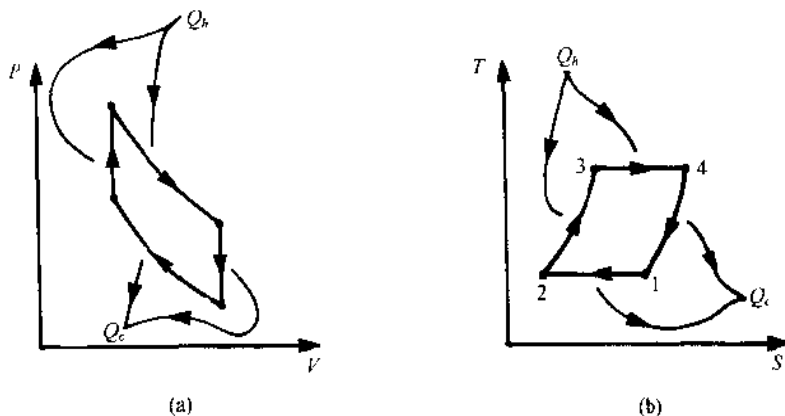


图 7-31

(b) 利用理想气体定律可得到表 7-31, 这里有三个独立参数: 初始参数中的任意两个及 T_3 , 可以用 P_3 代替 T_3 .

表 7-31

状态	P	V	T
1	P_1	V_1	T_1
2	rP_1	$(1/r)V_1$	T_1
3	$(rT_3/T_1)P_1$	$(1/r)V_1$	T_3
4	$(T_3/T_1)P_1$	V_1	T_3

7.161 利用图 7-31 推出斯特令循环效率的表达式.

解 在斯特令循环中有两个吸热阶段及两个放热阶段. [不要误认为等温过程中没有热交换!]

因此, $Q_h = {}_2Q_3 + {}_3Q_4$ 及 $Q_c = -{}_4Q_1 - {}_1Q_2$.

$1 \rightarrow 2$ 应用第一定律, ${}_1Q_2 = -{}_1W_2 = mRT_1 \ln(v_2/v_1) = -mRT_1 \ln r$.

同理, $3 \rightarrow 4$, ${}_3Q_4 = mRT_3 \ln r$.

$2 \rightarrow 3$, ${}_2Q_3 = mc_v(T_3 - T_2) = mc_v(T_3 - T_1)$.

$4 \rightarrow 1$, ${}_4Q_1 = mc_v(T_1 - T_4) = mc_v(T_1 - T_3)$,

因此,
$$\eta = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = \frac{{}_3Q_4 + {}_1Q_2}{{}_2Q_3 + {}_3Q_4} = \frac{(k-1)\ln r}{1 + \frac{T_3}{T_1 - T_3}(k-1)\ln r}$$

第八章 蒸汽循环

- 8.1 某理想的兰金循环由下列内部可逆的稳定流动过程组成: $1 \rightarrow 2$ 是绝热压缩过程, $2 \rightarrow 3$ 是等压加热过程, $3 \rightarrow 4$ 是绝热膨胀过程, $4 \rightarrow 1$ 是等压放热过程, 状态 1 是饱和液态水, 状态 3 是过热蒸汽, 试分别在 $P-v$ 图及 $T-s$ 图上画出该循环.

解 如图 8-1, 因为题中没有明确指出点 4 处于什么样的物理状态, 所以考虑了几种可能性, 字母 a 表示状态 4 是气液混合态, b 表示饱和蒸汽, c 表示过热蒸汽.

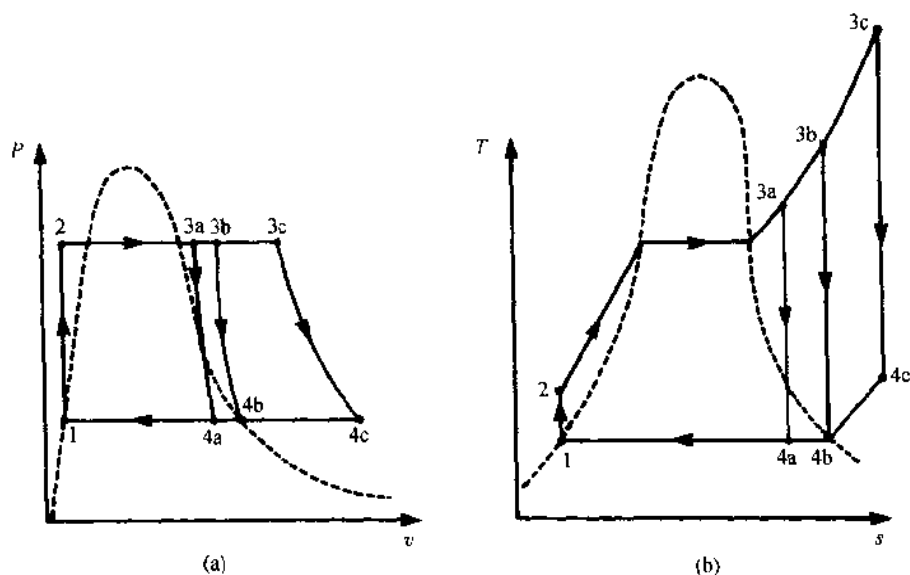


图 8-1

- 8.2 在 $P-v$ 图及 $T-s$ 图上表示表 8-1 所确定的蒸汽兰金循环. [$1 \rightarrow 2$ 之间是给水泵, $2 \rightarrow 3$ 之间是蒸汽锅炉, $3 \rightarrow 4$ 之间是蒸汽轮机, $4 \rightarrow 1$ 之间是冷凝器.]

表 8-1

状态	P/bar	T/K	x	$h/(\text{kJ/kg})$
1	0.0353	300	0.00	113
2	20	—	—	115
3	20	600	—	3087
4	0.0353	300	0.80	2057

解 如图 8-2.

- 8.3^D 试计算题 8.2 中循环中汽轮机的输出功 (kJ/kg).

解 因为对于一个绝热的稳定流动过程, 动能和势能可以忽略不计, 则 $W = \Delta H$, 所以,

$$w_s = -{}_3w_4 = h_3 - h_4 = 3087 - 2057 = 1030 \text{ kJ/kg}$$

- 8.4^D 计算题 8.2 中循环中水泵所消耗的功 (kJ/kg).

解 同题 8.3, $w_p = {}_1w_2 = h_2 - h_1 = 115 - 113 = 2 \text{ kJ/kg}$

- 8.5^D 题 8.2 中循环吸收的热量是多少 (kJ/kg)?

解 因为 ${}_2w_3 = 0$, 所以, ${}_2q_3 = q_h = h_3 - h_1 = 3087 - 115 = 2972 \text{ kJ/kg}$

- 8.6^D 题 8.2 中循环热效率是多少 (%)?

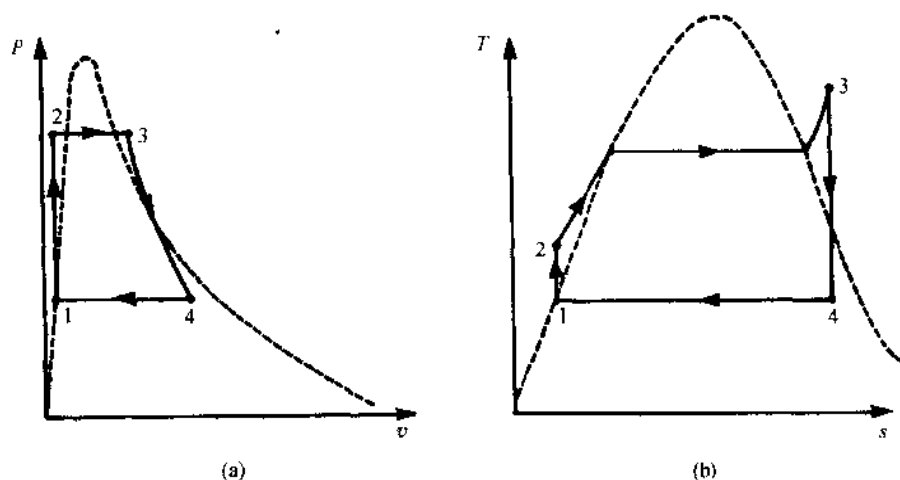


图 8-2

解 由题 8.3, 8.4, 8.5, 可以得到

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = (w_t - w_p)/q_h = (1030 - 2)/2972 = 34.6\%$$

- 8.7^D 在 P - v 图及 T - s 图上表示出表 8-2 所确定的蒸汽兰金循环。[1→2 之间是给水泵, 2→3 之间是锅炉, 3→4 之间蒸汽轮机, 4→1 之间是冷凝器。]

表 8-2

状态	P/psia	$T/^{\circ}\text{F}$	x	$h/(\text{Btu}/\text{lb}_m)$
1	1	—	0.00	70
2	300	—	—	71
3	300	600	—	1315
4	1	—	0.80	900

解 如图 8-2。

- 8.8^D 计算题 8.7 中循环中汽轮机的输出功 (Btu/lb_m)。

解 对一个绝热的稳定流动过程, 动能和势能可以忽略不计, 则 $W = \Delta H$, 所以,

$$w_t = -w_3 = h_3 - h_4 = 1315 - 900 = 415 \text{ Btu}/\text{lb}_m$$

- 8.9^D 计算题 8.7 中循环中水泵所消耗的功 (Btu/lb_m)。

解 问题 8.8, $w_p = -w_1 = h_2 - h_1 = 71 - 70 = 1 \text{ Btu}/\text{lb}_m$

- 8.10^D 题 8.7 中循环吸收的热量是多少 (Btu/lb_m)?

解 因为 $w_2 = 0$, 所以, $q_2 = q_h = h_3 - h_2 = 1315 - 71 = 1244 \text{ Btu}/\text{lb}_m$

- 8.11^D 题 8.7 中循环热效率是多少 (%)?

解 由题 8.8, 8.9 和 8.10, 得到

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = (w_t - w_p)/q_h = (415 - 1)/1244 = 0.333 = 33.3\%$$

- 8.12^D 某兰金循环在 400K 和 500K 之间工作, 计算: (a) 每循环中汽轮机的输出功 (kJ/kg); (b) 每循环中锅炉消耗的热量 (kJ/kg); (c) 每循环放出的热量 (kJ/kg); (d) 循环热效率 (%); (e) 此效率与同温限的卡诺循环效率的比值。

解 (a) $s_4 = s_3 = (500\text{K 的 } s_g) = 6.233 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$, 所以在状态 4, $6.233 = (1 - x_4)(1.605) + x_4(7.058)$, 则 $x_4 = 0.8487$, 因而

$$h_4 = (1 - 0.8487)(532.9) + (0.8487)(2716) = 2386 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$w_t = h_3 - h_4 = 2801 - 2386 = 415 \text{ kJ}/\text{kg}$$

(b) 绝热过程 1→2, $\bar{v}\Delta P = \Delta h$, 则

$$h_2 = h_1 + v_1(P_2 - P_1) = (532.9 \text{ kJ}/\text{kg}) + (0.001067 \text{ m}^3/\text{kg})(12640 - 2451 \text{ kPa}) = 535.5 \text{ kJ}/\text{kg}$$

(c) $h_1 = (400\text{K 的 } h_f) = 532.9\text{kJ/kg}$, $h_4 = 2386\text{kJ/kg}$, 所以

$$q_c = h_4 - h_1 = 2386 - 532 = 1853\text{kJ/kg}$$

(d) $\eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (1853/2265) = 0.1819$

(e) $\eta^* = 1 - (T_c/T_h) = 1 - (400/500) = 0.200$, $\eta/\eta^* = 0.1819/0.200 = 90.95\%$

- 8.13^D 某兰金循环在 $60 \sim 600^\circ\text{F}$ 之间工作, 计算: (a) 每循环中汽轮机的输出功 (Btu/lb_m); (b) 每循环中锅炉消耗的热量 (Btu/lb_m); (c) 每循环放出的热量 (Btu/lb_m); (d) 循环热效率; (e) 此效率与同温限下的卡诺效率的比值。

解 8.13 (a) $s_4 = s_3 = (600^\circ\text{F 的 } s_g) = 1.333\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 因此在状态 4, $1.333 = (1 - x_4)(0.056) + x_4(2.094)$, 则 $x_4 = 0.6266$, $h_4 = (1 - 0.6266)(28.1) + (0.6266)(1088) = 692.2\text{Btu/lb}_m$,

$$w_t = h_3 - h_4 = 1167 - 692 = 475\text{Btu/lb}_m$$

(b) 绝热过程 $1 \rightarrow 2$ 中 $\bar{v}\Delta P = \Delta h$, 则 $h_2 = h_1 + v_{f1}(P_2 - P_1) = (28.1\text{Btu/lb}_m) + (0.01603\text{ft}^3/\text{lb}_m)[(1542 - 0.3)\text{lb}_f/\text{in}^2](144\text{in}^2/\text{ft}^2)/(778\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 32.7\text{Btu/lb}_m$, 所以 $q_h = h_3 - h_2 = 1167 - 32.7 = 1134\text{Btu/lb}_m$ 。

(c) $h_1 = (60^\circ\text{F 的 } h_f) = 28.1\text{Btu/lb}_m$, $h_4 = 692.2\text{Btu/lb}_m$, 所以,

$$q_c = h_4 - h_1 = 692 - 28 = 664\text{Btu/lb}_m$$

(d) $\eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (664/1134) = 0.4144$

(e) $\eta^* = 1 - (T_c/T_h) = 1 - (520/1060) = 0.5094$ $\eta/\eta^* = 0.4144/0.5094 = 81.4\%$

- 8.14 某理想的兰金循环中, 压强为 1bar 的饱和液态水 (点 1) 在水泵中等熵加压到 150bar (点 2), 然后保持压强不变, 水在锅炉中预热变成饱和水蒸气 (点 3), 接着水蒸气进入蒸汽轮机等熵膨胀到 1bar (点 4), 最后水蒸气进入冷凝器并凝结为原饱和液态水。 (a) 在 T - s 图上画出这个循环。 (b) 水泵消耗的功是多少 (kJ/kg)? (c) 汽轮机中产生的功是多少 (kJ/kg)? (d) 循环热效率是多少 (%)?

解 8.14 (a) 如图 8-3。

(b) 液态水具有不可压缩性, 所以水泵的功为

$$\begin{aligned} w_p &= \int v dP = \bar{v}\Delta P = v_{f1}(P_2 - P_1) \\ &= (1.043 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg})[(150 - 1) \times 10^5\text{kPa}] = 15.5\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

(c) $w_t = h_3 - h_4$, 状态 4 位于点 4, 所以 $s_4 = s_3 = (150\text{bar 时的 } s_g) = 5.314\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, 因此 $5.314 = (1 - x_4)(1.303) + x_4(7.360)$, 则 $x_4 = 0.6622$, $h_4 = (1 - 0.6622)(417.5) + (0.6622)(2675) = 1912\text{kJ/kg}$, 而 $h_3 = 2612\text{kJ/kg}$, 所以 $w_t = 2612 - 1912 = 700\text{kJ/kg}$ 。

(d) 循环中吸收的热量 $q_h = h_3 - h_2 = h_3 - (h_1 + w_p) = 2612 - (417.5 + 15.5) = 2179\text{kJ/kg}$, 因此,

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = (w_t - w_p)/q_h = (700 - 15.5)/2179 = 31.4\%$$

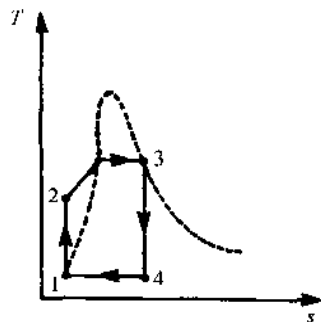


图 8-3

- 8.15^D 某理想的兰金循环中, 压强为 1psia 的饱和液态水 (点 1) 在水泵中等熵加压到 2500psia (点 2), 然后保持压强不变, 水在锅炉中预热变成饱和水蒸气 (点 3), 接着水蒸气进入蒸汽轮机等熵膨胀到 1psia (点 4), 最后水蒸气进入冷凝器并凝结为原饱和液态水。 (a) 在 T - s 图上画出这个循环。 (b) 水泵消耗的功是多少 (Btu/lb_m)? (c) 汽轮机输出的功是多少 (Btu/lb_m)? (d) 循环热效率是多少 (%)?

解 8.15 (a) 如图 8-3。

(b) $w_p = v_{f1}(P_2 - P_1) = (0.0161\text{ft}^3/\text{lb}_m)(2499 \times 144\text{lb}_f/\text{ft}^2)/(778\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 7.45\text{Btu/lb}_m$

(c) 状态 4 位于点 4, 所以 $s_4 = s_3 = (2500\text{psia 的 } s_g) = 1.234\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 则 $1.234 = (1 - x_4)(0.133) + x_4(1.970)$, $x_4 = 0.599$, $h_4 = (1 - 0.599)(69.7) + 0.599(1106) = 690\text{Btu/lb}_m$, 所以,

$$w_t = h_3 - h_4 = 1092 - 690 = 402\text{Btu/lb}_m$$

(d) 循环中吸收的热量 $q_h = h_3 - h_2 = h_3 - (h_1 + w_p) = 1092 - (69.7 + 7.5) = 1015\text{Btu/lb}_m$, 所以,

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = (w_t - w_p)/q_h = (402 - 7)/1015 = 38.9\%$$

- 8.16^D 如果题 8.14 中的理想循环被下面的实际循环代替, 该循环中水泵的等熵效率为

75%, 汽轮机的等熵效率为 90%, 计算: (a) 水泵实际消耗的功(kJ/kg); (b) 汽轮机实际输出的功(kJ/kg); (c) 循环的实际效率(%).

解 因为使用了效率低的设备, 水泵消耗的功增加, 汽轮机输出的功减少, 用下标 a 表示实际量, 下标 s 表示等熵过程中的量.

$$(a) \quad w_{pa} = w_{ps} / \eta_p = 15.5 / 0.75 = 20.7 \text{ kJ/kg}$$

$$(b) \quad w_a = \eta_a w_{as} = (0.9)(700) = 630 \text{ kJ/kg}$$

$$(c) \quad q_{hs} = h_3 - (h_1 + w_{pa}) = 2612 - (417.5 + 20.7) = 2174 \text{ kJ/kg. 因此,}$$

$$\eta_o = (w_a - w_{pa}) / q_{hs} = (630 - 21) / 2174 = 28.0\%$$

8. 17^D 如果题 8. 15 中的理想循环被下列实际循环代替: 循环中水泵和汽轮机的等熵效率都是 90%. 计算: (a) 水泵实际消耗的功(Btu/lb_m); (b) 汽轮机的实际输出功(Btu/lb_m); (c) 循环的实际效率.

解 因为使用了效率低的设备, 水泵消耗的功增加了, 汽轮机发出的功将减少, 用下标 a 代表实际量, 下标 s 表示等熵过程中的量.

$$(a) \quad w_{pa} = w_{ps} / \eta_p = 7.45 / 0.90 = 8.28 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(b) \quad w_a = \eta_a w_{as} = (0.9)(402) = 361.8 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(c) \quad h_{2a} - h_1 + w_{pa} = 69.7 + 8.3 = 78.0 \text{ Btu/lb}_m. \text{ 所以 } q_{hs} = h_3 - h_{2a} = 1092 - 78 = 1014 \text{ Btu/lb}_m, \text{ 则}$$

$$\eta_o = (w_a - w_{pa}) / q_{hs} = (361.8 - 8.3) / 1014 = 34.9\%$$

8. 18^D 如果题 8. 14 中循环中水泵的功忽略不计, 下列问题将发生什么变化? (a) 每次循环中的净功(kJ/kg); (b) 热效率(%).

解 (a) $w'_{net} = w_a = 700 \text{ kJ/kg}$, 而不是 684 kJ/kg .

(b) $\eta' = w'_{net} / q'_h = w_a / (h_3 - h_1) = 700 / (2612 - 418) = 31.9\%$, 而不是 31.4% . 由此可得出结论: 对兰金循环作一阶近似计算时, 水泵的功可以忽略不计.

8. 19^D 如果题 8. 15 中循环水泵的功忽略不计, 下列问题将发生什么变化? (a) 每次循环中的净功(Btu/lb_m); (b) 热效率(%).

解 (a) $w'_{net} = w_a = 402 \text{ Btu/lb}_m$, 而不是 395 Btu/lb_m .

(b) $\eta' = w'_{net} / q'_h = w_a / (h_3 - h_1) = 402 / (1092 - 70) = 39.3\%$, 而不是 38.9% , 由此得出下面的结论: 对兰金循环作一阶近似计算时, 水泵的功可以忽略不计.

8. 20^D 在兰金循环中, 如果锅炉排出的水蒸气质量超过 90%, 那么汽轮机中因蒸汽膨胀而输出功的损失将减小, 现在考虑一个在 1bar 到 150bar 之间工作的兰金循环, 水泵的等熵效率为 75%. (a) 如果锅炉出口处水蒸气的湿度不超过 10%, 那么汽轮机的等熵效率为多少? (b) 循环热效率是多少(%)?

解 这里对题 8. 14 和 8. 16 作了一修改, 那里, 水泵的实际功 T 为 20.7 kJ/kg , 汽轮机等熵过程中输出功为 700 kJ/kg , 锅炉中需要加热 2174 kJ/kg , 锅炉出口处及汽轮机入口处的焓为 $h_3 = 2612 \text{ kJ/kg}$.

(a) 在汽轮机中膨胀到状态 5 (图 8-4), 此时的干度 $x_5 = 0.90$, 因此 1bar 时, $h_5 = (1 - 0.90)(417.5) + (0.90)(2675) = 2449 \text{ kJ/kg}$. 汽轮机的实际输出功为 $w_a = h_3 - h_5 = 2612 - 2449 = 163 \text{ kJ/kg}$. 可以得到等熵效率为 $163/700 = 23.3\%$.

(b) $\eta = w_{net} / q_h = (w_a - w_{pa}) / q_h = (163 - 21) / 2174 = 6.5\%$.

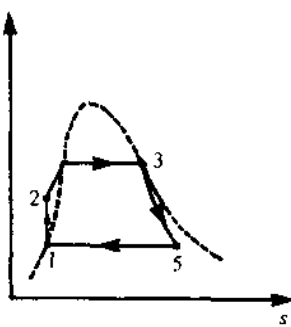


图 8-4

8. 21^D 在兰金循环中, 如果锅炉排出的水蒸气质量超过 90%, 那么汽轮机中因蒸汽膨胀而输出的功的损失将减小. 现在考虑一个在 1psia 到 2500psia 之间工作的兰金循环, 水泵的等熵效率为 90%. (a) 如果在锅炉出口处水蒸气的湿度不超过 10%, 那么汽轮机的等熵效率为多少? (b) 循环的热效率是多少(%)?

解 这里是对题 8.15 和 8.17 作了一个修改。那里水泵的实际功为 8.3 Btu/lb_m , 汽轮机的等熵输出功为 402 Btu/lb_m , 锅炉中需加热 1014 Btu/lb_m 。锅炉出口及汽轮机入口处的焓为 $h_3 = 1092 \text{ Btu/lb}_m$ 。

(a) 在汽轮机中膨胀到状态 5 (图 8-4), 此时的干度 $x_5 = 0.90$, 因此, 在压强为 1 bar 时, 有 $h_5 = (1 - 0.90)(69.7) + (0.90)(1106) = 1002 \text{ Btu/lb}_m$ 。汽轮机的实际输出功为 $w_w = h_3 - h_5 = 1092 - 1002 = 90 \text{ Btu/lb}_m$ 。汽轮机的等熵效率为 $90/402 = 22.4\%$ 。

(b) $\eta = w_{\text{net}}/q_h = (w_w - w_p)/q_h = (90 - 8)/1014 = 8.1\%$

- 8.22 利用图 8-2 中的标号, 列出下列物理量的理论表达式: (a) 水泵的功 w_p ; (b) 汽轮机的功 w_e ; (c) 热效率 η 。假设此兰金循环是理想循环。

解 (a) $w_p = h_2 - h_1$

(b) $w_e = h_3 - h_4$

(c) $\eta = [(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] / (h_3 - h_2)$

- 8.23 题 8.22 中, 如果循环中泵功可以忽略, 结果将发生什么变化?

解 题 8.22 中, 令 $h_2 = h_1$ 。

- 8.24 如果水泵的等熵效率为 η_p , 汽轮机的等熵效率为 η_e , 那么题 8.22 中的结果怎么修改?

解 根据题 8.16 和 8.17 的结果,

(a) $w_{p0} = (h_{2s} - h_1) / \eta_p$

(b) $w_{e0} = \eta_e (h_3 - h_{4s})$

(c) $\eta = (w_{e0} - w_{p0}) / (h_3 - h_{2s})$, 则 $\eta = \frac{\eta_p \eta_e (h_3 - h_{4s}) - (h_{2s} - h_1)}{\eta_p (h_3 - h_1) - (h_{2s} - h_1)}$

- 8.25^D 利用题 8.24 得出的公式证明题 8.16 中循环热效率的计算结果。

解 由题 8.16, 得 $\eta_p = 0.75$, $\eta_e = 0.90$, 由题 8.14, 知 $h_1 = 417.5 \text{ kJ/kg}$, $h_{2s} = 417.5 + 15.5 = 433 \text{ kJ/kg}$, $h_3 = 2612 \text{ kJ/kg}$, $h_{4s} = 1912 \text{ kJ/kg}$, 因此

$$\eta = \frac{(0.75)(0.90)(2612 - 1912) - (433 - 417.5)}{(0.75)(2612 - 417.5) - (433 - 417.5)} = 28.1\%$$

- 8.26^D 利用题 8.24 得出的公式证明题 8.17 中循环热效率的计算结果。

解 由题 8.17 得 $\eta_p = \eta_e = 0.90$, 由题 8.15 得 $h_1 = 69.7 \text{ Btu/lb}_m$, $h_{2s} = 69.7 + 7.5 = 77.2 \text{ Btu/lb}_m$, $h_3 = 1092 \text{ Btu/lb}_m$, $h_{4s} = 690 \text{ Btu/lb}_m$ 。因而

$$\eta = \frac{(0.90)^2 (1092 - 690) - (77.2 - 69.7)}{(0.90)(1092 - 69.7) - (77.2 - 69.7)} = 34.9\%$$

- 8.27^D 某兰金循环中, 压强为 1 bar 的饱和液态水 (点 1) 等熵加压到 150 bar (点 2)。首先在锅炉中加热, 然后保持压强为 150 bar 使其过热, 温度达到 750 K (点 6), 接着在汽轮机内绝热可逆地膨胀到压强为 1 bar (点 7)。最后进入冷凝器, 凝结为饱和液体水。(a) 在 $T-s$ 图上画出这个循环。(b) 水泵消耗的功是多少 (kJ/kg)? (c) 汽轮机中输出的功是多少 (kJ/kg)? (d) 循环热效率是多少 (%)

解 (a) 如图 8-5。

(b) 水泵功的计算与题 8.14 相同, $w_p = 15.5 \text{ kJ/kg}$ 。

(c) 压强为 150 bar , 温度为 750 K (点 6) 时, $h_6 = 3243 \text{ kJ/kg}$, $s_6 = 6.260 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = s_7$ 。因为 s_7 比压强为 1 bar 时的饱和蒸汽的熵小, 所以膨胀后的状态是气液混合态, $s_7 = 6.260 = (1 - x_7) 1.303 + x_7 (7.360)$, 则 $x_7 = 0.8184$, 由这个条件, 得到 $h_7 = (1 - 0.8184) \times (417.5) + (0.8184)(2675) = 2265 \text{ kJ/kg}$ 。因此汽轮机的功为

$$w_e = h_6 - h_7 = 3243 - 2265 = 978 \text{ kJ/kg}$$

(d) 循环净功 $w_{\text{net}} = w_e - w_p = 978 - 16 = 962 \text{ kJ/kg}$ 。水达到沸腾并过热需要的热量 $q_h = h_6 - h_2 = h_6 - (h_1 + w_p) = 3243 - (417.5 + 15.5) = 2810 \text{ kJ/kg}$ 。因此, $\eta = w_{\text{net}}/q_h = 962/2810 = 34.2\%$ 。

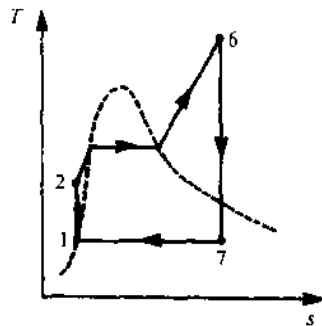


图 8-5

8.28^D 如果使水蒸气过热达到 1000K, 重解题 8.27 中的(c)和(d).

解 (c) 压强为 150bar, 温度为 1000K(点 6') 时, $h'_6 = 3904 \text{ kJ/kg}$, $s'_6 = 7.023 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = s'_7$, 因为 s'_7 也比压强为 1bar 时的饱和蒸汽的熵小, 所以膨胀后的状态也应该是气液混合态. $s'_7 = 7.023 = (1 - x'_7)(1.303) + x'_7(7.360)$, 则 $x'_7 = 0.9444$, 由这个条件, 得到 $h'_7 = (1 - 0.9444)(417.5) + (0.9444) \times (2675) = 2549 \text{ kJ/kg}$. 因此汽轮机的功为

$$w'_e = h'_6 - h'_7 = 3904 - 2549 = 1355 \text{ kJ/kg}$$

(d) 循环净功 $w'_{\text{net}} = w'_e - w_p = 1355 - 16 = 1339 \text{ kJ/kg}$. 水达到沸腾并过热需吸热 $q'_h = h'_6 - h_2 = 3904 - 433 = 3471 \text{ kJ/kg}$. 因此 $\eta = w'_{\text{net}}/q'_h = 1339/3471 = 38.6\%$.

8.29^D 参见题 8.27 和 8.28, 为了使得等熵膨胀后水蒸气的干度为 90%, 那么必须使水蒸气过热达到多高温度(K)?

解 将图 8-5 中新点称为点 6'' 和 7'', 我们必须求出 T''_6 , 使得 $x''_7 = 0.90$. 因而我们要求 $s''_6 = s''_7 = (1 - 0.90)(1.303) + (0.90)(7.360) = 6.754 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 查表 A5 可知, $P_6 = 150 \text{ bar}$, $T = 900 \text{ K}$ 时 $s = 6.755$, 因此 $T''_6 = 900 \text{ K}$ (非常接近).

8.30^D 某兰金循环在 1 到 2500psia 之间工作, 过热水蒸气离开锅炉时的温度为 800°F, 计算: (a) 水泵需要消耗的功 (Btu/lb_m); (b) 汽轮机产生的功 (Btu/lb_m); (c) 循环的热效率 (%). 采用图 8-5 中的标号.

解 (a) 由题 8.15 知, $w_p = 7.45 \text{ Btu/lb}_m$.

(b) 在 $P = 2500 \text{ psia}$, $T = 800^\circ\text{F}$ (点 6) 时, 由表 A3 得 $h_6 = 1303 \text{ Btu/lb}_m$, $s_6 = 1.412 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s_7$, 因此, 状态 7 的干度满足 $1.412 = (1 - x_7)(0.133) + x_7(1.978)$, 因而 $x_7 = 0.6932$, $h_7 = (1 - 0.6932) + (0.6932)(1106) = 788 \text{ Btu/lb}_m$. 因此汽轮机的功为 $w_e = h_6 - h_7 = 1303 - 788 = 515 \text{ Btu/lb}_m$.

(c) 净功 $w_{\text{net}} = w_e - w_p = 515 - 7.45 \approx 508 \text{ Btu/lb}_m$. 吸热 $q_h = h_6 - h_2 = h_6 - (h_1 + w_p) = 1303 - (69.7 + 7.45) \approx 1226 \text{ Btu/lb}_m$. 因此 $\eta = 508/1226 = 41.4\%$.

8.31^D 如果过热水蒸气离开锅炉时温度达到 1000°F, 重解题 8.30 中的(b)和(c).

解 (b) 在 2500psia, 1000°F (点 6') 时, $h'_6 = 1457 \text{ Btu/lb}_m$, $s'_6 = 1.527 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s'_7$, 因此, x'_7 满足 $1.527 = (1 - x'_7)(0.133) + x'_7(1.978)$, 则 $x'_7 = 0.7555$, 由此得 $h'_7 = (1 - 0.7555)(69.7) + (0.7555)(1106) = 853 \text{ Btu/lb}_m$. 因此 $w_e = h'_6 - h'_7 = 1457 - 853 = 604 \text{ Btu/lb}_m$.

(c) 净功 $w'_{\text{net}} = w'_e - w_p = 604 - 7.45 = 597 \text{ Btu/lb}_m$, 吸热 $q'_h = h'_6 - h_2 = 1457 - 77.1 = 1380 \text{ Btu/lb}_m$, 因此 $\eta = 597/1380 = 43.3\%$.

8.32^D 参见题 8.30 和 8.31, 为了使水蒸气等熵膨胀后的干度刚好为 80%, 那么水蒸气必须过热达到多高温度(°F)?

解 将图 8-5 中新点称为点 6'' 和 7'', 现在我们要求出 T''_6 , 使得 $x''_7 = 0.80$. 即要求 $s''_6 = s''_7 = (1 - 0.8)(0.133) + (0.8)(1.978) = 1.609 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 查表 A3 可知, $P_6 = 2500 \text{ psia}$, $T = 900^\circ\text{F}$ 时, $s = 1.476 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 以及 $T = 1000^\circ\text{F}$ 时 $s = 1.527 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 因此 T''_6 肯定比 1000°F 更高. 假设存在下面的线性推断: $T''_6 = 1000 + [(1.609 - 1.527)/(1.527 - 1.476)](100) = 1161^\circ\text{F}$. 如果可能的话, 可以用扩展的水蒸气参数表来检验这个推断的正确性.

8.33 如图 8-6, 某兰金循环中, 压强为 1bar 的饱和液态水(点 1)在水泵中等熵加压至 150bar (点 2), 首先在锅炉中加热, 然后保持压强为 150bar 不变使其过热, 温度达到 1000K (点 8), 接着在汽轮机内绝热可逆膨胀至压强为 20bar 时再加热到 1000K, 最后水蒸气第二次绝热可逆膨胀至压强为 1bar. (a) 产生的总功是多少 (kJ/kg)? (b) 循环热效率是多少 (%)?

解 (a) 由题 8.14(b), 水泵的功 $w_p = 15.5 \text{ kJ/kg}$. 点 8 (150bar, 1000K), $h_8 = 3904 \text{ kJ/kg}$, $s_8 = 7.023 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = s_{13}$, $p_{13} = 20 \text{ bar}$ 时有 $s_g = 6.338 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此经过第一次等熵膨胀后水的物理状态为饱和水蒸气, 从比例式

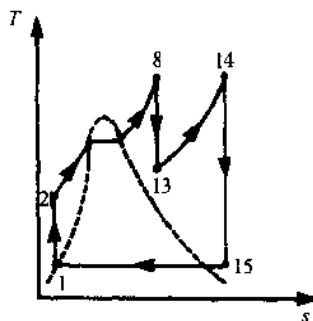


图 8-6

$(h_{13} - 3087)/(3198 - 3087) = (7.023 - 6.875)/(7.053 - 6.875)$ 可以求出与 s_{13} 对应的 $h_{13} = 3179 \text{ kJ/kg}$. 所以第一次在汽轮机中膨胀产生的功 $w_{e1} = h_8 - h_{13} = 3904 - 3179 = 725 \text{ kJ/kg}$. 同理, 点 14 (20bar, 1000K), $h_{14} = 3978 \text{ kJ/kg}$, $s_{14} = 8.011 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = s_{15}$, $P_{15} = 1 \text{ bar}$ 时, $s_x = 7.360 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 水经过第二次膨胀后的物理状态是过热水蒸气根据比例式 $(h_{15} - 2929)/(3028 - 2929) = (8.011 - 7.944)/(8.134 - 7.944)$, 可以求出与 s_{15} 对应的 $h_{15} = 2964 \text{ kJ/kg}$. 所以第二次在汽轮机中膨胀产生的功 $w_{e2} = h_{14} - h_{15} = 3978 - 2964 = 1014 \text{ kJ/kg}$. 产生的总功 $w_e = w_{e1} + w_{e2} = 1739 \text{ kJ/kg}$.

(b) 通常 $\eta = (w_e - w_p)/q_h$, 这里 q_h 与 w_e 一样, 也应该是两个贡献的总和, $q_h = (h_8 - h_2) + (h_{14} - h_{13}) = (3904 - 433) + (3978 - 3179) = 4270 \text{ kJ/kg}$, 因此 $\eta = (1739 - 16)/4270 = 40.4\%$.

8. 34^D 参见题 8. 33 和图 8 - 6, 如果把水蒸气看作理想气体, 关于布雷顿循环的题 7. 143 的结果就是蒸汽第一次膨胀后的最佳压强, $P_{13} = (P_{\text{high}}/P_{\text{low}})^{1/2} = (150 \times 1)^{1/2} = 12.25 \text{ bar}$, 现在取 $P'_{13} = 10 \text{ bar}$, 通过计算总功来检验这个论断的正确性.

解 水蒸气第一次膨胀至 10bar (点 13') 时, $s'_{13} = s_8 = 7.023 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 这时又是处于过热状态, 所以有 $(h'_{13} - 2891)/(3002 - 2891) = (7.023 - 6.823)/(7.036 - 6.823)$, 得 $h'_{13} = 2995 \text{ kJ/kg}$, $w'_{e1} = h_8 - h'_{13} = 3904 - 2995 = 909 \text{ kJ/kg}$. 同理, 水蒸气从点 14' (10bar, 1000K) 第二次膨胀到点 15' (1bar), $s'_{15} = s'_{14} = 8.336 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. $(h'_{15} - 3129)/(3231 - 3129) = (8.336 - 8.309)/(8.472 - 8.309)$, 则 $h'_{15} = 3146 \text{ kJ/kg}$. 因此 $w'_{e2} = h'_{14} - h'_{15} = 3984 - 3146 = 838 \text{ kJ/kg}$. $w'_e = w'_{e1} + w'_{e2} = 1474 \text{ kJ/kg}$. 现在 $P'_{13} = 10 \text{ bar}$ 比 $P_{13} = 20 \text{ bar}$ 更接近于最佳压强 12.25bar, 对应的输出功确实更大 ($1474 - 1739 = 8 \text{ kJ/kg}$). 这支持了上述论断 (至少不矛盾): 最大的功在压强为 12.25bar 时获得. 不管怎样, 最大值看来并不尖锐.

8. 35^D 参见图 8 - 6, 某兰金循环中, 压强为 1psia 的饱和液态水 (点 1) 在水泵中等熵加压至 2500psia (点 2), 首先在锅炉中预热, 然后保持压强为 2500psia 不变使其过热, 温度达到 1000°F (点 8), 接着在汽轮机内绝热可逆膨胀到压强为 1psia. (a) 所做的总功是多少 (Btu/lb_m)? (b) 循环的热效率是多少 (%)?

解 (a) 由题 8. 15(b), 知泵功 $w_p = 7.4 \text{ Btu/lb}_m$, 点 8, $h_8 = 1303 \text{ Btu/lb}_m$, $s_8 = 1.412 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s_{13}$. 由表 A3 知这时水的状态是气液混合态 (从图 8 - 6 可以看出点 13 位于饱和线下方), 将 40 和 60psia 时的数据取平均, $1.412 = (1 - x_{13})(0.410) + x_{13}(1.662)$, 得 $x_{13} = 0.8003$, 因而 $h_{13} = (1 - 0.8003)(249.2) + (0.8003)(1174) = 989 \text{ Btu/lb}_m$. 第一次膨胀时所做的功 $w_{e1} = h_8 - h_{13} = 1303 - 989 = 314 \text{ Btu/lb}_m$. 同理, 点 14 (50psia, 1000°F), $h_{14} = 1534 \text{ Btu/lb}_m$, $s_{14} = 2.000 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s_{15}$, 在 $P_{15} = 1 \text{ psia}$ 时, $s_x = 1.978 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 所以经过第二次膨胀后水的状态为过热水蒸气, 温度 $T \approx 101.7 + [(2.000 - 1.978)/(2.015 - 1.978)](150 - 101.7) = 130.4^\circ\text{F}$, $h_{15} = 1106 + (28.7/48.3)(22) = 1119 \text{ Btu/lb}_m$. 在汽轮机内第二次膨胀所做的功 $w_{e2} = h_{14} - h_{15} = 1534 - 1119 = 415 \text{ Btu/lb}_m$, 所做的总功 $w_e = w_{e1} + w_{e2} = 729 \text{ Btu/lb}_m$.

(b) 通常 $\eta = (w_e - w_p)/q_h$, 这里 q_h 和 w_e 一样应该是两部分贡献的总和, $q_h = (h_8 - h_2) + (h_{14} - h_{13}) = (1457 - 77) + (1534 - 989) = 1925 \text{ Btu/lb}_m$, 因此, $\eta = (729 - 7)/1925 = 37.5\%$.

8. 36^D 参见题 8. 35 和图 8 - 6, 如果把水蒸气当作理想气体, 关于布雷顿循环的题 7. 143 表明 $P_{13} = (P_h/P_l)^{1/2} = (2500 \times 1)^{1/2} = 50 \text{ psia}$ 时输出功最大. 因此题 8. 35(a) 得出的数值 729 Btu/lb_m 是最大值, 分别取 $P'_{13} = 40 \text{ psia}$, $P''_{13} = 60 \text{ psia}$, 通过计算所做的总功检验上述论断是否正确.

解 水蒸气膨胀至 40psia 时, $s'_{13} = s_8 = 1.412 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 由表可知这时水的状态必定是气液混合态, 由 $1.412 = (1 - x'_{13})(0.392) + x'_{13}(1.679)$, 得 $x'_{13} = 0.7925$, 因此 $h'_{13} = (1 - 0.7925)(249.2) + (0.7925)(1174) = 981.7 \text{ Btu/lb}_m$. 第一次膨胀所做的功 $w'_{e1} = h_8 - h'_{13} = 1303 - 982 = 321 \text{ Btu/lb}_m$. 同理, 点 14' (40psia, 1000°F), $h'_{14} = 1534 \text{ Btu/lb}_m$, $s'_{14} = 2.022 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s'_{15}$, $P'_{15} = 1 \text{ psia}$ 时, $s_x = 1.978 \text{ Btu/lb}_m$. 第二次膨胀后水必处于过热蒸汽状态温度 $T'_{15} \approx 150 + [(2.022 - 2.015)/(2.051 - 2.015)](50) = 160^\circ\text{F}$, $h'_{15} = 1128 + (9.7/50)22 = 1132 \text{ Btu/lb}_m$. 第二次膨胀所做的功 $w'_{e2} = h'_{14} - h'_{15} = 1534 - 1132 = 402 \text{ Btu/lb}_m$. 膨胀所做的总功 $w'_e = w'_{e1} + w'_{e2} = 721 \text{ Btu/lb}_m$, 比假设的最大值小 8 Btu/lb_m. 水蒸气膨胀至 60psia 时, $s''_{13} = s_8 = 1.412 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 查表可知这时水的物理状态又是气液混合态, $1.412 = (1 - x''_{13})(0.427) + x''_{13}(1.644)$, 则 $x''_{13} = 0.8094$, 对应地得到

$h''_{13} = (1 - 0.8094)249.2 + (0.8094)(1174) = 998 \text{ Btu/lb}_m$, 因此第一次膨胀所做的功 $w''_{s1} = h_8 - h''_{13} = 1303 - 998 = 305 \text{ Btu/lb}_m$, 同理点 14' (60psia, 1000°F), $h''_{14} = 1533 \text{ Btu/lb}_m$, $s''_{14} = 1.977 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s''_{15}$, 这个数值在 s_g 数值的 0.001 Btu/lb_m 的变化范围内, 所以状态 15' 必是水的饱和蒸汽态, $h''_{15} = 1106 \text{ Btu/lb}_m$, $w''_{s2} = h''_{14} - h''_{15} = 1533 - 1106 = 427 \text{ Btu/lb}_m$, $w''_s = w''_{s1} + w''_{s2} = 732 \text{ Btu/lb}_m$.

这个值比假设的最大值高 3 Btu/lb_m.

由此可以得出结论:理想气体理论,以及此理论下的压强等比中项,对这个循环不适用.

- 8.37^D 某理想化的兰金蒸汽循环中,汽轮机进口处蒸汽压强为 100bar,温度为 800K,在汽轮机内膨胀后排出的水蒸气压强为 1bar,此流体冷凝后又经水泵送回锅炉——过热器,计算水蒸气离开汽轮机时的湿度(液态水的含量).

解 如图 8-5,汽轮机入口处(点 6),查表可得到与水蒸气有关的数据, $h_6 = 3442 \text{ kJ/kg}$, $s_6 = 6.685 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = s_7$, 因而 $6.685 = (1 - x_7)(1.303) + x_7(7.360)$, 则 $x_7 = 0.8886 = 88.9\%$. 这是水蒸气的含量,湿度则为 $1 - x_7 = 11.1\%$.

- 8.38^D 计算题 8.37 中水泵的功.

解 $w_p = \int_1^2 v dP = v_f (P_2 - P_1) = (1.043 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})(99 \text{ bar})(100 \text{ kPa/bar}) = 10.3 \text{ kJ/kg}$.

- 8.39^D 计算题 8.37 中汽轮机输出的功.

解 汽轮机的功 $w_t = h_6 - h_7$, 因为 $x_7 = 0.8886$, $h_7 = (1 - 0.8886)(417.5) + (0.8886)(2675) = 2424 \text{ kJ/kg}$, 所以 $w_t = 3442 - 2424 = 1018 \text{ kJ/kg}$.

- 8.40 计算题 8.37 中整个循环的热效率.

解 由题 8.38 和 8.39 得 $w_{\text{net}} = w_t - w_p = 1018 - 10 = 1008 \text{ kJ/kg}$, 而且 $q_h = h_6 - h_2 = h_6 - (h_1 + w_p) = 3442 - 418 - 10 = 3014 \text{ kJ/kg}$, 因而 $\eta = w_{\text{net}}/q_h = 1008/3014 = 33.4\%$.

- 8.41^D 某理想化的兰金蒸汽循环中,汽轮机进口处蒸汽压强为 100psia,温度为 800°F,在汽轮机内膨胀后排出的水蒸气压强为 10psia,此流体冷凝后又经水泵送回锅炉——过热器,计算蒸汽离开汽轮机时的湿度(液态水的含量).

解 如图 8-5,汽轮机入口处(点 6),查表可得到与水蒸气有关的数据, $h_6 = 1363 \text{ Btu/lb}_m$, $s_6 = 1.507 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s_7$, 因而 $1.507 = (1 - x_7)(0.284) + x_7(1.88)$, 则 $x_7 = 0.8132 = 81.3\%$, 这是水蒸气的含量,湿度为 $1 - x_7 = 18.7\%$.

- 8.42^D 计算题 8.41 中水泵的功.

解 $w_p = \int_1^2 v dP = v_f (P_2 - P_1)$
 $= (0.0166 \text{ ft}^3/\text{lb}_m)[(1500 - 10) \text{ lb}_f/\text{in}^2](144 \text{ in}^2/\text{ft}^2)/(778.16 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 4.6 \text{ Btu/lb}_m$

- 8.43 计算题 8.41 中等熵过程中汽轮机的功.

解 汽轮机输出的功 $w_t = h_6 - h_7$, 因为 $x_7 = 0.8132$, $h_7 = (1 - 0.8132)(161.3) + (0.8132)(1143) = 960 \text{ Btu/lb}_m$, 所以 $w_t = 1363 - 960 = 403 \text{ Btu/lb}_m$.

- 8.44^D 计算题 8.41 中锅炉——过热器中需输入的热量.

解 $q_h = h_6 - h_2 = h_6 - (h_1 + w_p) = 1363 - 161 - 5 = 1197 \text{ Btu/lb}_m$

- 8.45 图 8-7 表示一个带有开放给水加热器的水蒸气循环操作过程,从冷凝器出来的水(点 6)被从汽轮机放出的水蒸气(在点 4)加热,因此在位置 1 处的最终混合体是饱和液体,然后此液体以通常的加压方式送入锅炉(在点 2 处). (a)从锅炉流出到位置 4 的水蒸气比率 y 是多少? (b)循环热效率的表达式是什么?

解 (a) 每单位质量的水从点 1 流到点 3, 设 $\dot{m}_6 = y$, 则 $\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = 1 - y$, 对绝热的给水加热器, $y h_4 + (1 - y) h_7 = h_1$, 则 $y = (h_1 - h_7)/(h_4 - h_7)$.

(b) 因为有水蒸气流出到位置 4, 汽轮机的功减小, 第一阶段的功为 $1(h_3 - h_4)$, 第二阶段的功为 $(1 - y)(h_4 - h_5)$, 总的输出功 $w_t = (h_3 - h_4) + (1 - y)(h_4 - h_5)$. 水泵的功也改变了, 通向高压锅炉的水泵功为 $h_2 - h_1$. 但是现在 h_1 是对应于给水加热器工作压强的焓, 质量流量为 $(1 - y)$ 的水在低压水泵中加压, 因此水泵的总功 $w_p = (h_2 - h_1) + (1 - y)(h_7 - h_6)$, 吸收的热量 $q_h = h_3 - h_2$.

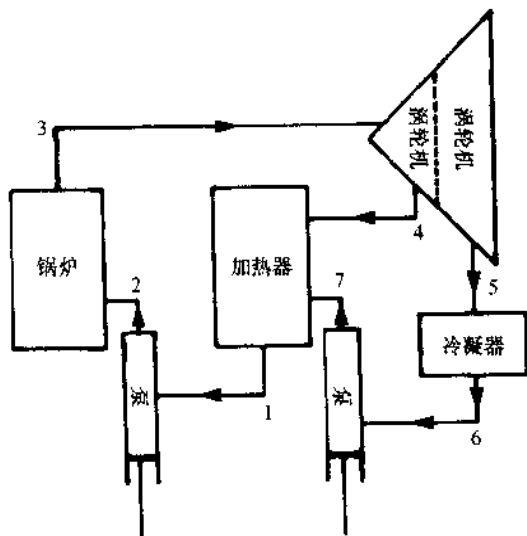


图 8-7

$$\eta = \frac{w_t - w_p}{q_h} = \frac{h_3 - h_4 - h_2 + h_1 + (1-y)(h_4 - h_5 - h_6 - h_7)}{h_3 - h_2} - 1 - \frac{(h_4 - h_1) - (1-y)(h_4 - h_5 + h_6 - h_7)}{h_3 - h_2} \quad (1)$$

将由(a)得到的 y 表达式代入式(1)——标准公式,可以得到简化形式

$$\eta = 1 - \frac{(h_4 - h_1)(h_5 - h_6)}{(h_3 - h_2)(h_4 - h_7)} \quad (2)$$

很显然,这是一个新的结果。

- 8.46^D 将一开放的给水加热器引入题 8.14 中的循环,压强为 1bar 的饱和液态水等熵压缩为 150bar 的饱和蒸汽,然后在汽轮机内等熵膨胀至 1bar,计算此循环的效率。

解 利用图 8-7 中的标号, $h_3 = 2612 \text{ kJ/kg}$, $h_5 = 1912 \text{ kJ/kg}$, $h_f = 417.5 \text{ kJ/kg}$, 使水蒸气从点 4 流出的最佳压强可视为对应于饱和温度 T_4 的压强, T_4 是锅炉和冷凝器饱和温度的平均值, $T_4 = (615.3 + 372.8)/2 = 494.1 \text{ K}$. 在表 A4 中最接近于这个饱和值的压强是 25bar, 如果汽轮机内的膨胀是一个等熵过程, 则 $s_3 = s_4 = s_5 = (150\text{bar 时的 } s_g) = 5.314 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 因为 $P_4 = 25\text{bar}$, 所以 $s_{g4} = 6.255$ 这个值比 5.314 大得多, 因此从点 4 流出的蒸汽应是气液混合物. 根据通常的方法, $s_4 = 5.314 = (1-x_4)(2.554) + x_4(6.255)$, 则 $x_4 = 0.7457$, $h_4 = (1-0.7457)(962.0) + (0.7457)(2820) = 2334 \text{ kJ/kg}$. 对点 5 重复上述过程, $s_5 = 5.314 = (1-x_5)(1.303) + x_5(7.360)$, 则 $x_5 = 0.6622$, $h_5 = (1-0.6622)(417.5) + (0.6622)(2675) = 1912 \text{ kJ/kg}$. 由题 8.45(a), 从汽轮机流出的比 $y = (h_1 - h_7)/(h_4 - h_7)$, 因为 $h_6 = (1\text{bar 时的 } h_f) = 417.5 \text{ kJ/kg}$, $w_t = v_{f6}(P_2 - P_1) = (1.043 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})[(2500-100) \text{ kPa}] = 2.5 \text{ kJ/kg}$. $h_7 = h_6 + w_t = 417.5 + 2.5 = 420 \text{ kJ/kg}$, $h_1 = (P_4 \text{ 时的 } h_f) = 962.0 \text{ kJ/kg}$. 将 h_1, h_4, h_7 的数值代入, 得 $y = (962.0 - 420)/(2334 - 420) = 542/1914 = 0.2832$. 由题 8.45(b), 汽轮机的输出功 $w_t = (h_3 - h_4) + (1-y)(h_4 - h_5) = (2612 - 2334) + (1-0.2832)(2334 - 1912) = 580 \text{ kJ/kg}$. 水泵的总功 $w_p = w_1 + (1-y)w_2 = v_{f1}(P_2 - P_1) + (1-y)w_2 = (1.197 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})[(1500-2500) \text{ kPa}] + (1-0.2832)(12.5 \text{ kJ/kg}) = 16.8 \text{ kJ/kg}$. 因此 $w_{\text{net}} = w_t - w_p = 580 - 17 = 563 \text{ kJ/kg}$. 循环中吸收的热量 $q_h = h_3 - h_2 = 2612 - 977 = 1635 \text{ kJ/kg}$, 这里 $h_2 = h_1 + w_1$, 循环热效率 $\eta = w_{\text{net}}/q_h = 563/1635 = 34.4\%$.

- 8.47^D 将一开放的给水加热器引入题 8.30 中简单的兰金循环中,再分析此循环。

解 题 8.30 中的兰金循环在 1psia 到 2500psia 之间工作, 过热温度为 800°F , 此循环中各设备的效率高达 100%. 根据图 8-7 中的标号, 题 8.30 的结果为 $h_3 = 1303 \text{ Btu/lb}_m$, $h_5 = 788 \text{ Btu/lb}_m$, $h_6 = 69.7 \text{ Btu/lb}_m$, $s_3 = s_4 = s_5 = 1.412 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 给水加热器的最佳工作条件为 (P_4, T_4) , T_4 是饱和温度, $T_4 = \frac{1}{2}(T_3 + T_5) = \frac{1}{2}(668.2 + 101.7) = 385^\circ\text{F}$, T_3 和 T_5 是与 P_3 和 P_5 对应的饱和温度。

表中与此温度最接近的压强为 200psia, 与此对应的温度为 381.8°F, 为了避免应用插入法, 我们将选择水蒸气表中的这个压强值。

将 1lb_m 的饱和水从 1psia 加压到 200psia 需要的功, $w_7 = v_{f6}(P_7 - P_6) = (0.0161 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) [(200 - 1) \text{ lb}_f/\text{in}^2] (144 \text{ in}^2/\text{ft}^2) / (778.16 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 0.6 \text{ Btu}/\text{lb}_m$. 因为 $h_6 = 69.7 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, $h_7 = h_6 + w_7 = 69.7 + 0.6 = 70.3 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, 又 $s_4 = s_3 = 1.412 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = (1 - x_4)(0.544) + x_4(1.546)$, 则 $x_4 = 0.8663$, $h_4 = (1 - 0.8663)(355.5) + 0.8663(1198.8) = 1086.0 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, 因 $h_1 = (200 \text{ psia 时的 } h_f) = 355.5 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, 由加热器中能量守恒, 得 $y h_4 + (1 - y) h_7 = h_1$, 则 $(1086.0)y + (70.3) \times (1 - y) = 355.5$, 则 $y = 0.2808$.

根据题 8.45, 汽轮机输出的功

$$w_t = (h_3 - h_4) + (1 - y)(h_4 - h_5) = (1303 - 1086) + (1 - 0.2808)(1086 - 788) \\ = 217 + 214 = 431 \text{ Btu}/\text{lb}_m$$

水泵功

$$w_p = h_2 - h_1 + (1 - y)(h_7 - h_6) = 7.8 + (1 - 0.2808)(70.3 - 69.7) = 8.2 \text{ Btu}/\text{lb}_m$$

而 $h_2 - h_1 = v_{f1}(P_2 - P_1) = (0.0184)(2500 - 200)(144)/778 = 7.8 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, 因此净功

$$w_{\text{net}} = w_t - w_p = 431 - 8 = 423 \text{ Btu}/\text{lb}_m$$

吸收的热量

$$q_h = h_3 - h_2 = 1303 - 363 = 940 \text{ Btu}/\text{lb}_m$$

其中 $h_2 = h_1 + 7.8$, 所以

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = 423/940 = 45.0\%$$

8.48^D 利用题 8.45 中式(2)验证题 8.46 得出的效率。

$$\text{解 } \eta = 1 - \frac{(h_4 - h_1)(h_3 - h_5)}{(h_3 - h_2)(h_4 - h_7)} = 1 - \frac{(2334 - 962)(1912 - 418)}{(2612 - 977)(2334 - 420)} = 34.5\%$$

8.49^D 利用题 8.45 中式(2)验证题 8.47 得出的效率。

$$\text{解 } \eta = 1 - \frac{(h_4 - h_1)(h_3 - h_5)}{(h_3 - h_2)(h_4 - h_7)} = 1 - \frac{(1086 - 356)(788 - 70)}{(1303 - 363)(1086 - 70)} = 45.1\%$$

8.50 假设一个蒸汽动力厂提供一个供热加热器, 就像图 8-7 那样, 各阶段参量(阶数、压强、状态)如下: 1. 20psia, 饱和液体; 2. 300psia; 3. 300psia, 干饱和蒸汽; 4. 20psia; 5. 1psia; 6. 1psia, 饱和液体; 7. 20psia, 水泵和汽轮机的效率都是 100%, 计算: (a) 流过给水泵的量占总量的比率; (b) 循环热效率。

解 (a) 300psia, 干饱和蒸汽(点 3)有 $h_3 = 1203 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, $s_3 = 1.511 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 所以在流出点 4 处, $s_4 = s_3$, $P_4 = 20 \text{ psia}$, 在 20psia 时 $s_g = 1.732 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 因为 $s_4 < s_g$, 所以点 4 对应的状态为气液混合态, 用通常的方法求出 x_4 和 h_4 , $1.511 = (1 - x_4)(0.336) + x_4(1.732)$, 则 $x_4 = 0.8417$, $h_4 = (1 - 0.8417)(196.3) + (0.8417)(1156) = 1004 \text{ Btu}/\text{lb}_m$. 同理, 膨胀后与点 5 对应的状态, $s_5 = s_3 = 1.511 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $P_5 = 1 \text{ psia}$, $1.511 = (1 - x_5)(0.133) + x_5(1.978)$, 则 $x_5 = 0.7469$, $h_5 = (1 - 0.7469)(69.7) + (0.7469)(1106) = 844 \text{ Btu}/\text{lb}_m$. 通过给水加热器, $\dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_1 h_1$, 每单位质量流过锅炉, $\dot{m}_1 = 1$, $\dot{m}_4 + \dot{m}_7 = \dot{m}_1$, 则 $h_1 = \dot{m}_7 h_7 + (1 - \dot{m}_7) h_4$, 点 6, 状态为 1psia 的饱和液态, $h_1 = (1 \text{ psia 时的 } h_f) = 69.7 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, 由其他的精确数值得, $w_7 = v_{f6}(P_7 - P_6) = 10.016 (\text{ft}^3/\text{lb}_m) [(20 - 1) \text{ lb}_f/\text{in}^2] (144 \text{ in}^2/\text{ft}^2) / (778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 0.1 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, 则 $h_7 = h_6 + w_7 = 69.7 + 0.1 = 69.8 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, 在点 1 为 20psia 的饱和液体, $h_1 = (20 \text{ psia 的 } h_f) = 196.3 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, \dot{m}_7 可由含 h_1 的方程解得, $196.3 = \dot{m}_7(69.8) + (1 - \dot{m}_7)(1004)$, 得 $\dot{m}_7 = 0.8646$.

(b) 汽轮机输出的总功

$$w_t = (h_3 - h_4) + \dot{m}_7(h_4 - h_5) \\ = (1203 - 1004) + (0.8646)(1004 - 844) = 337 \text{ Btu}/\text{lb}_m$$

水泵加压消耗的功

$$w_p = w_7 + w_2$$

从 6 流到 7 的质量为 \dot{m}_7 , 因此水泵的功

$$w_p = (0.8646)(0.06) + 1(0.0168)(300 - 20)(144/778) \\ = 0.9 \text{ Btu}/\text{lb}_m$$

因此,

$$w_{\text{net}} = w_t - w_p = 336 \text{ Btu}/\text{lb}_m$$

$$q_h = h_3 - h_2 = h_3 - (h_2 + w_2) = 1203 - (196.3 + 0.9) = 1006 \text{ Btu}/\text{lb}_m$$

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = 336/1006 = 33.4\%$$

解 设

$$\eta = 1 - \frac{(1004 - 196)(844 - 70)}{(1203 - 197)(1004 - 70)} = 33.4\%$$

8.52 图 8-8 表示某个带有两个开放的给水加热器的蒸汽循环操作过程,与图 8-7 中循环不同的地方为:流入另一个给水加热器的比率为 z , (a) 流出的比率 y 和 z 分别为多少? (b) 循环热效率的表达式是什么?

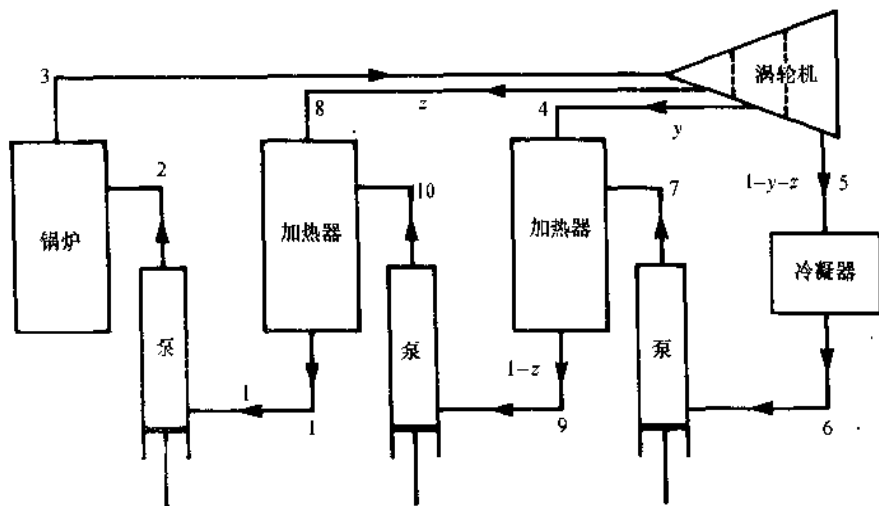


图 8-8

解 8.48 (a)重复题 8.45 中(a)对单个给水加热器的分析,这里流过冷凝器的比率为 $1-y-z$ 。对于在 1,7,9 之间的绝热给水加热器, $y h_4 + (1-y-z) h_7 = (1-z) h_6$ 。同理,对于在 1,8,10 之间的绝热给水加热器, $z h_8 + (1-z) h_{10} = h$ 。由这两个方程可解出 y, z 。

$$y = \frac{(h_8 - h_1)(h_9 - h_7)}{(h_4 - h_7)(h_8 - h_{10})}, \quad z = \frac{h_1 - h_{10}}{h_8 - h_{10}} \quad (1)$$

(b) 现在我们可以求出输出功、输入功、热效率的公式。

首先,汽轮机的输出功为 $w_6 = h_3 - h_4 + (1-z)(h_8 - h_4) + (1-y-z)(h_4 - h_5)$, 将 y, z 的表达式(1)代入,得

$$w_e = h_3 - h_6 + \frac{h_8 - h_1}{h_8 - h_{10}} \left[h_8 - h_1 + \frac{(h_1 - h_5)(h_1 - h_9)}{h_4 - h_7} \right] \quad (2)$$

其次,水泵中输入的功

$$w_0 = h_2 - h_1 + (1-x)(h_{10} - h_9) + (1-y-z)(h_7 - h_6)$$

将式(1)代入,得

$$w_p = h_2 - h_1 + \frac{h_5 - h_4}{h_8 - h_{10}} \left[h_{10} - h_9 + \frac{(h_7 - h_6)(h_4 - h_6)}{h_4 - h_7} \right] \quad (3)$$

将公式(2)和(3)以及 $q_h = h_3 - h_2$ 代入 $\eta = (w_s - w_p)/q_h$, 经过代数方法计算后, 得到简化的形式

$$\eta = 1 - \left(\frac{h_5 - h_6}{h_3 - h_2} \right) \left(\frac{h_8 - h_1}{h_8 - h_{10}} \right) \left(\frac{h_5 - h_7}{h_4 - h_9} \right)$$

8. 53^D 某蒸汽循环在 150bar, 1000K 和 1bar 之间工作, 汽轮机和水泵的效率为 100%, 循环中使用了两个开放的给水加热器, 由汽轮机分两部分进入加热器的水蒸气可当作理想气体, 计算: (a) 流过每个给水加热器的比率; (b) 循环的热效率。

解

解 (a) 按图 8-8 给各个状态标号, $h_3 = 3904 \text{ kJ/kg}$, $s_3 = 7.023 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $P_6 = 1 \text{ bar}$, 最佳的 P_1 和 P_8 级间压强可通过题 8.46 中的标准求出, 将对应于 P_4 和 P_8 的饱和温度记为 T_4 和 T_8 。把对应于锅炉和冷凝器的饱和温度记为 T_β 和 T_α , 则对于低压给水加热器来讲, $T_4 = (T_\beta + T_\alpha)/2$, 对于高压给水加热器来讲, $T_8 = (T_\beta + T_4)/2$, 联立方程求解得,

$$T_4 = (T_3 + 2T_2)/3, \quad T_8 = (T_7 + 2T_6)/3$$

由表 A5 知, 1 bar 时, $T_g = 372.8 \text{ K}$, 在 150 bar 时, $T_g = 615.3 \text{ K}$, 因此

$$T_4 = 453.6\text{K}, \quad T_R = 534.5\text{K}$$

为了避免根据水蒸气表内推,取压强 $P_4 = 10\text{bar}$ (饱和温度为 453.1K) 和 $P_8 = 50\text{bar}$ (饱和温度为 537.1K)。由这些压强,可求出点 4 和点 8 的焓。

等熵膨胀, $s_3 = s_4 = s_5 = s_8 = 7.023\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

$P_8 = 50\text{bar}$ 时, $s_g = 5.974$, s_8 比此值高,说明水蒸气过热,由过热水蒸气表内推得实际温度。

$$t_8 = 750 + [(7.023 - 6.907)/(7.049 - 6.907)](50)$$

$$= 750 + (0.116/0.142)(50) = 790.8\text{K}$$

$$h_8 = 3380 + (40.8/50)(116) = 3475\text{kJ/kg}$$

注意:上面计算 $T_8 = 534.5\text{K}$ 只是求 P_8 的一种方法,实际温度(这里用 t_8 表示)决定于汽轮机入口处的条件及汽轮机的效率。

同理,在 10bar 时, $s_4 = 7.023\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, 这个值比 $s_g = 6.584\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 高,所以水蒸气又处于过热状态,由过热蒸汽表内推得

$$t_4 = 500 + [(7.023 - 6.823)/(7.036 - 6.823)](50) = 546.9\text{K}$$

$$h_4 = 2891.2 + (46.9/50)(111) = 2995\text{kJ/kg}$$

最后,在 1bar 时, $s_5 = 7.023\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, 这个值比 $s_g = 7.360\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 低,这时水处于气液混合态,则

$$7.023 = (1 - x_5)(1.303) + x_5(7.360) \quad \text{则} \quad x_5 = 0.9444$$

$$h_5 = (1 - 0.9444)(417.5) + (0.9444)(2675) = 2549.4\text{kJ/kg}$$

冷却至点 6。

$$h_6 = (1\text{bar 时的 } h_f) = 417.5\text{kJ/kg}$$

对 6→7 等熵压缩过程,

$${}_6w_7 = v_{f6}(P_7 - P_6) = (1.043 \times 10^{-3}\text{m}^3/\text{kg})[(1000 - 100)\text{kPa}] = 0.9\text{kJ/kg}$$

则

$$h_7 = h_6 + {}_6w_7 = 418.4\text{kJ/kg}$$

对低压给水加热器,流入量为 $1 - y - z$, 焓 $h_9 = (10\text{bar 时的 } h_f) = 762.7\text{kJ/kg}$,

给水加热器中绝热, $(1 - y - z)(418.4) + y(2995) = (1 - z)(762.7)$,

$$2577y + 344z = 344 \quad (1)$$

对高压给水加热器,流入量为 $1 - z$, 焓 $h_{10} = h_9 + {}_9w_{10}$; 流入量为 z 时, 焓为 h_8 ; 流出量为 1 时, 焓 $h_1 = (50\text{bar 时的 } h_f) = 1154.4\text{kJ/kg}$, 估算出水泵功

$${}_9w_{10} = v_{f9}(P_{10} - P_9) = (1.127 \times 10^{-4})(5000 - 1000) = 4.5\text{kJ/kg}$$

$$h_{10} = 762.7 + 4.5 = 767.2\text{kJ/kg}$$

对绝热的给水加热器, $(1 - z)(767.2) + z(3475) = 1(1154.4)$, 则 $z = 0.1430$, 由式(1)得 $y = 0.1145$ 。

(b) 将所有的水蒸气从 50bar 的点 1 压缩至锅炉的压强 150bar 即点 2 需要做功为

$${}_1w_2 = v_{f1}(P_2 - P_1) = (1.286 \times 10^{-3})(15000 - 5000) = 12.9\text{kJ/kg}$$

因此

$$h_2 = h_1 + {}_1w_2 = 1154.4 + 12.9 = 1167.3\text{kJ/kg}$$

锅炉内加入的热量

$$q_b = h_3 - h_2 = 3904 - 1167 = 2737\text{kJ/kg}$$

总的输出功 $w_r = (h_3 - h_8) + (1 - z)(h_8 - h_4) + (1 - y - z)(h_4 - h_5)$

$$= (3904 - 3475) + (1 - 0.1430)(3475 - 2995) + (1 - 0.1430 - 0.1145)(2995 - 2549) \\ = 1171\text{kJ/kg}$$

输入的总功 $w_p = (h_2 - h_1) + (1 - z)(h_{10} - h_9) + (1 - y - z)(h_7 - h_6)$

$$= (1167.3 - 1154.4) + (1 - 0.1430)(767.2 - 762.7) + (1 - 0.1145 - 0.1430)(418.4 - 417.5) \\ = 17.5\text{kJ/kg}$$

所以效率

$$\eta = (w_r - w_p)/q_b = (1171 - 18)/2737 = 42.1\%$$

8.54^P 某蒸汽循环在 2500psia , 1000°F 和 1psia 之间工作, 汽轮机和水泵的效率为 100% 。循环中有两个开放的给水加热器, 从汽轮机流出的水蒸气分两路进入加热器, 且视为理想过程, 计算: (a) 流过每个给水加热器的蒸汽比率; (b) 循环效率。

解 (a) 按图 8-8 给状态标号, 有

$$h_3 = 1457\text{Btu/lbm}, \quad s_3 = 1.527\text{Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}, \quad P_6 = 1\text{psia}$$

P_4 和 P_8 之间的最佳压强可通过题 8.46 中的数据确定。将与 P_4 和 P_8 对应的饱和温度分别记为 T_4 和 T_8 , 与锅炉和冷凝器对应的饱和温度分别记为 T_p 和 T_c 。

对低压给水加热器, $T_4 = (T_8 + T_c)/2$

对高压给水加热器, $T_8 = (T_p + T_4)/2$

联立方程求解,得

$$T_1 = (T_g + 2T_a)/3 \quad T_3 = (T_a + 2T_g)/3$$

由表 A3 知,在 1psia 时, $T_a = 101.7^\circ\text{F}$; 在 2500psia 时, $T_g = 668.2^\circ\text{F}$. 因此 $T_1 = 290.5^\circ\text{F}$, $T_3 = 479.4^\circ\text{F}$. 为了避免根据水蒸气表内推,我们取 $P_4 = 60\text{psia}$ (对应温度为 292.7°F), 取 $P_8 = 600\text{psia}$ (对应温度为 486.2°F).

由这两个压强可以求出点 4 和点 8 的焓. 对等熵膨胀过程, $s_3 = s_4 = s_5 = s_8 = 1.527\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 在 $P_8 = 600\text{psia}$ 时, $s_g = 1.446$, s_g 比这个值高,说明此时水蒸气过热,由过热蒸汽表内推得

$$t_8 = 500 + [(1.527 - 1.459)/(1.523 - 1.459)](100) = 593.2^\circ\text{F}$$

$$h_8 = 1216 + (93.2/100)(74) = 1285\text{Btu/lb}_m$$

注意:上面求 T_8 (497.4°F) 只是求 P_8 的一种方法,实际温度(这里用 t_8 表示)决定于汽轮机入口处的条件以及汽轮机的效率.

同理,在 60psia 时, $s_4 = 1.527\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 此值比 $s_g = 1.644\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 小,因此这时水处于液-气混合态. 根据通常的方法, $s_{\text{max}} = 1.527 = (1 - x_4)(0.4277) + x_4(1.644)$, 则 $x_4 = 0.9039$,

$$h_4 = (1 - 0.9039)(262.2) + (0.9039)(1178) = 1090\text{Btu/lb}_m$$

最后,在 1psia 时, $s_5 = 1.527\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 比 $s_g = 1.978\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 低,此时水处于气液混合态,

$$1.527 = (1 - x_5)(0.133) + x_5(1.978), \text{ 则 } x_5 = 0.7556$$

$$h_5 = (1 - 0.7556)(69.7) + (0.7556)(1106) = 888\text{Btu/lb}_m$$

压缩到状态 6 时, $h_6 = (1\text{psia 时的 } h_f) = 69.7\text{Btu/lb}_m$. 从状态 6 等熵压缩到状态 7,

$${}_6w_7 = v_{f6}(P_7 - P_6) = (0.0161)(60 - 1)(144/778) = 0.2\text{Btu/lb}_m$$

因此

$$h_7 = h_6 + {}_6w_7 = 69.7 + 0.2 = 69.9\text{Btu/lb}_m$$

对低压给水加热器,流入比率为 $1 - y - z$, 焓 $h_7 = 69.9\text{Btu/lb}_m$; 流入比率为 y , 焓 $h_1 = 1090\text{Btu/lb}_m$.

流出比率为 $1 - z$, 焓 $h_9 = (60\text{psia 时的 } h_f) = 262.2\text{Btu/lb}_m$. 给水加热器绝热, 则

$$(1 - y - z)(69.9) + y(1090) = (1 - z)(262.2)$$

即

$$1090y + 192z = 192 \quad (1)$$

对高压给水加热器,流入比例为 $1 - z$, 焓 $h_{10} = h_9 + {}_9w_{10}$; 流入比例为 z , 焓为 h_8 ; 流出量为 1, $h_3 = (60\text{psia 时的 } h_f) = 471.7\text{Btu/lb}_m$.

因为

$${}_9w_{10} = v_{f9}(P_{10} - P_9) = (0.0174)(600 - 60)(144/778) = 1.7\text{Btu/lb}_m$$

$$h_{10} = h_9 + {}_9w_{10} = 262.2 + 1.7 = 263.9\text{Btu/lb}_m$$

又因为给水加热器绝热, $(1 - z)(263.9) + z(1285) = 1(471.7)$, 则 $z = 0.2035$, 代入式(1), 得 $y = 0.1500$.

(b) 将所有的水蒸气从 600psia 的点 1 压缩至压强为 2500psia 的锅炉内即点 2 需要做的功

$${}_1w_2 = v_{f1}(P_2 - P_1) = (0.0201)(2500 - 600)(144/778) = 7.1\text{Btu/lb}_m$$

$$h_2 = h_1 + {}_1w_2 = 471.7 + 7.1 = 478.8\text{Btu/lb}_m$$

在锅炉内吸收的热量为

$$q_k = h_3 - h_2 = 1457 - 479 = 978\text{Btu/lb}_m$$

输出的总功 $w_r = (h_3 - h_8) + (1 - z)(h_8 - h_4) + (1 - y - z)(h_4 - h_5)$

$$= (1457 - 1285) + (1 - 0.2035)(1285 - 1090) + (1 - 0.1500 - 0.2035)(1090 - 888) \\ = 458\text{Btu/lb}_m$$

输入的总功

$$w_p = (h_2 - h_1) + (1 - z)(h_{10} - h_9) + (1 - y - z)(h_7 - h_6)$$

$$= (478.8 - 471.7) + (1 - 0.1500)(263.9 - 262.2) + (1 - 0.1500 - 0.2035)(69.9 - 69.7) \\ = 8.6\text{Btu/lb}_m$$

所以效率为

$$\eta = (w_r - w_p)/q_k = (458 - 9)/978 = 45.9\%$$

8.55^D 用题 8.52 中的式(4)验证题 8.53(b)得出的效率.

解 33

$$\eta = 1 - \frac{(2549 - 418)(3475 - 1154)(2995 - 763)}{(3904 - 1167)(3475 - 767)(2995 - 418)} = 42.2\%$$

8.56^D 用题 8.52 中的式(4)验证题 8.54(b)算得的效率.

解 33

$$\eta = 1 - \frac{(888 - 70)(1285 - 472)(1090 - 262)}{(1457 - 479)(1285 - 264)(1090 - 70)} = 45.9\%$$

8.57^D 某简单的理想兰金循环在 380K 到 480K 之间工作, 此循环的热效率是多少(%)?

解 33

使用图 8-2 中的符号标注方法, $P_1 = 1.287\text{bar}$, $v_1 = 0.001049\text{m}^3/\text{kg}$, $h_1 = 448.0\text{kJ/kg}$. 此

状态的饱和液态水在水泵中加压,水泵消耗的功为

$$w_p = v_f (P_2 - P_1) = (0.001049 \text{ m}^3/\text{kg}) [(1790 - 129) \text{ kPa}] = 1.7 \text{ kJ/kg}$$

这里 $P_2 = 17.90 \text{ bar}$, 它是与 480 K 对应的饱和压强, 因而 $h_2 = h_1 + w_p = 448.0 + 1.7 = 449.7 \text{ kJ/kg}$

$h_3 = (480 \text{ K 时的 } h_g) = 2795 \text{ kJ/kg}$, $s_3 = s_4 = 6.377 \text{ kJ/kg} = (1 - x_4)(1.384) + x_4(7.275)$, 则 $x_4 = 0.8476$,

$$h_4 = (1 - 0.8476)(448.0) + (0.8476)(2687) = 2346 \text{ kJ/kg}$$

汽轮机产生的功 $w_t = h_3 - h_4 = 2795 - 2346 = 449 \text{ kJ/kg}$

$$w_{\text{net}} = w_t - w_p = 449 - 2 = 447 \text{ kJ/kg}$$

锅炉内吸入的热量 $q_h = h_3 - h_2 = 2795 - 450 = 2345 \text{ kJ/kg}$

因此 $\eta = w_{\text{net}}/q_h = 447/2345 = 19.1\%$

8.58^D 某简单的理想兰金循环在 200°F 到 400°F 之间工作, 循环的热效率是多少(%)?

解 按图 8-2 中的符号标注方法, $P_1 = 11.53 \text{ psia}$, $v_1 = 0.01664 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $h_1 = 168.1 \text{ Btu/lb}_m$.

此状态的饱和液态水在水泵中压缩需要的功为

$$w_p = v_f (P_2 - P_1) = (0.01664)(247.2 - 11.5)(144/778) = 0.7 \text{ Btu/lb}_m$$

这里 $P_2 = 247.2 \text{ psia}$, 它是与 400°F 对应的饱和压强.

$$h_2 = h_1 + w_p = 168.1 + 0.7 = 168.8 \text{ Btu/lb}_m$$

$$h_3 = (400^\circ\text{F 时的 } h_g) = 1202 \text{ Btu/lb}_m$$

$s_4 = s_3 = 1.527 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = (1 - x_4)(0.294) + x_4(1.776)$, 则

$$x_4 = 0.8320, h_4 = (1 - 0.8320)(168.1) + (0.8320)(1146) = 1092 \text{ Btu/lb}_m$$

汽轮机的输出功 $w_t = h_3 - h_4 = 1202 - 1092 = 110 \text{ Btu/lb}_m$

锅炉内吸热 $q_h = h_3 - h_2 = 1202 - 169 = 1033 \text{ Btu/lb}_m$

则 $w_{\text{net}} = w_t - w_p = 110 - 1 = 109 \text{ Btu/lb}_m$

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = 109/1033 = 10.6\%$$

8.59^D 题 8.57 循环中冷凝器的温度下降到 360 K , 此循环的热效率为多少(%)?

解 点 1 的有关数据变为 $P_1 = 0.621 \text{ bar}$, $v_1 = 0.001034 \text{ m}^3/\text{kg}$, $h_1 = 363.7 \text{ kJ/kg}$, 这里

$$w_p = v_f (P_2 - P_1) = (0.001034)(1790 - 62) = 1.8 \text{ kJ/kg}$$

因此 $h_2 = h_1 + w_p = 363.7 + 1.8 = 366 \text{ kJ/kg}$

在膨胀过程中, $s_4 = s_3 = 6.377 = (1 - x_4)(1.156) + x_4(7.521)$, 则 $x_4 = 0.8203$, $h_4 = (1 - 0.8203)(363.7) + (0.8203)(2655) = 2243 \text{ kJ/kg}$.

$$w_t = h_3 - h_4 = 2795 - 2243 = 552 \text{ kJ/kg}$$

$$q_h = h_3 - h_2 = 2795 - 366 = 2429 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = (w_t - w_p)/q_h = 550/2429 = 22.6\%$$

8.60^D 题 8.58 中循环中冷凝器的温度降到 150°F , 此循环的热效率为多少(%)?

解 点 1 的有关数据变为 $P_1 = 3.817 \text{ psia}$, $v_1 = 0.01634 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, $h_1 = 118.0 \text{ Btu/lb}_m$, $w_p = v_f (P_2 - P_1) = (0.01634)(247.2 - 3.8)(144/778) = 0.7 \text{ Btu/lb}_m$. 因而

$$h_2 = h_1 + w_p = 118.0 + 0.7 = 118.7 \text{ Btu/lb}_m$$

在膨胀过程中, $s_4 = s_3 = 1.527 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = (1 - x_4)(0.215) + x_4(1.870)$, 则 $x_4 = 0.7927$, $h_4 = (1 - 0.7927)(118.0) + (0.7927)(1126) = 917 \text{ Btu/lb}_m$.

在汽轮机产生的功 $w_t = h_3 - h_4 = 1202 - 917 = 285 \text{ Btu/lb}_m$. 在锅炉内吸收的热量为 $q_h = h_3 - h_2 = 1202 - 119 = 1083 \text{ Btu/lb}_m$. 净功 $w_{\text{net}} = w_t - w_p = 284 \text{ Btu/lb}_m$.

因此 $\eta = w_{\text{net}}/q_h = 284/1083 = 26.2\%$

8.61^D 题 8.57 循环中锅炉温度升高到 500 K , 循环热效率是多少(%)?

解 与锅炉温度 500 K 对应的压强为 26.40 bar ,

$$w_p = v_f (P_2 - P_1) = (0.001049)(2640 - 129) = 2.6 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = 6.233 \text{ kJ/kg} = s_4$$

因此 $6.233 = (1 - x_4)(1.384) + x_4(7.275)$

则 $x_4 = 0.8231$, $h_4 = (1 - 0.8231)(448.1) + (0.8231)(2687) = 229 \text{ kJ/kg}$.

汽轮机输出的功 $w_t = h_3 - h_4 = 2801 - 2291 = 510 \text{ kJ/kg}$, 在锅炉内吸热 $q_h = h_3 - h_2 = 2801 - 451 = 2350 \text{ kJ/kg}$.

因此 $\eta = (w_t - w_p) / q_h = 507 / 2350 = 21.6\%$

8. 62^D 题 8. 58 循环中锅炉温度升高到 450°F , 循环的热效率是多少(%)?

解 与锅炉温度 450°F 对应的压强为 422.1 psia .

$$w_p = v_1 (P_2 - P_1) = (0.01943)(422.1 - 11.5)(144/778) = 1.5 \text{ Btu/lb}_m$$

$$s_1 = 1.481 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s_4 = (1 - x_1)(0.294) + x_1(1.776)$$

$$\text{则 } x_1 = 0.8009, h_4 = (1 - 0.8009)(168.1) + (0.8009)(1146) = 951 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\text{汽轮机输出的功 } w_t = h_3 - h_4 = 1206 - 951 = 255 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\text{在锅炉内吸收的热量 } q_h = h_3 - h_2 = 1206 - 170 = 1036 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\text{效率 } \eta = (w_t - w_p) / q_h = 253 / 1036 = 24.4\%$$

8. 63^D 题 8. 57 循环中, 水蒸气的初始压强等于与饱和温度 480K 对应的锅炉压强, 然后加热到 550K , 循环的热效率是多少(%)?

解 在 500K 时过热压强达 17.90 bar , $w_p = 1.7 \text{ kJ/kg}$ (和前面一样), $h_1 = 448.0 \text{ kJ/kg}$

$$h_2 = h_1 + w_p = 448.0 + 1.7 = 449.7 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{点 3, } h_3 = 2866.2 + (2.9/5)(2839.4 - 2866.2) = 2851 \text{ kJ/kg}, s_3 = 6.598 + (2.9/5)(6.422 - 6.598) = 6.496 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = s_4, \text{因而 } 6.496 = (1 - x_1)(1.384) + x_1(7.275), \text{则}$$

$$x_1 = 0.8678, h_4 = (1 - 0.8678)(448.0) + (0.8678)(2687) = 2391 \text{ kJ/kg}$$

汽轮机产生的功 $w_t = h_3 - h_4 = 2851 - 2391 = 460 \text{ kJ/kg}$, 吸收的热量

$$q_h = h_3 - h_2 = 2851 - 450 = 2401 \text{ kJ/kg}$$

因此

$$\eta = (w_t - w_p) / q_h = 485 / 2401 = 20.2\%$$

8. 64^D 题 8. 57 循环中, 水蒸气的初始压强为与饱和温度 400°F 对应的锅炉压强, 然后加热到 450°F , 循环的热效率是多少(%)?

解 450°F 时过热压强达 247.2 psia , $w_p = 0.7 \text{ Btu/lb}_m$ (和前面一样), $h_2 = h_1 + w_p = 168.1 + 0.7 = 168.8 \text{ Btu/lb}_m$,

$$h_3 = 1241 + (47.2/50)(1235 - 1241) = 1235 \text{ Btu/lb}_m$$

$$s_4 = s_3 = 1.594 + (47.2/50)(1.563 - 1.594) = 1.565 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}, \text{因而 } 1.565 = (1 - x_4)(0.294) + x_4(1.776), \text{则 } x_4 = 0.8576, h_4 = (1 - 0.8576)(168.1) + (0.8576)(1146) = 1007 \text{ Btu/lb}_m,$$

汽轮机产生的功 $w_t = h_3 - h_4 = 1235 - 1007 = 228 \text{ Btu/lb}_m$, 锅炉内及吸热过程吸入的总热量

$$q_h = h_3 - h_2 = 1235 - 169 = 1066 \text{ Btu/lb}_m$$

因此效率

$$\eta = (w_t - w_p) / q_h = 227 / 1066 = 21.3\%$$

8. 65 参见题 8. 57, 8. 59, 8. 61 (或题 8. 58, 8. 60 和 8. 62). (a) 为什么能最大地提高热效率的方法却很少用? (b) 通常用什么方法提高热效率?

解 (a) 冷凝器的温度下降对循环热效率将产生很大的改进, 但为了使热量从兰金循环中转移出去, 冷凝器温度必须比环境温度高些, 因此温度的下降是有限的. (b) 使过热. 这种方法可以避免去增加锅炉的压强和强度, 成本较低.

8. 66^D 图 8-9 表示某蒸汽循环的一部分, 水蒸气的性质已在表 8-3 中给出, (a) 求沿着路线 $4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$ 的质量流量与沿着路线 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 6$ 质量流量的比值. (b) 在点 6 处的焓是多少(kJ/kg)?

表 8-3

状态	P/bar	T/K	$h/(\text{kJ/kg})$	$s/(\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$
1	50	500	976	2.575
2	50	400	536	1.596
3	500	404	584	1.611
4	500	350	362	1.007
5	500	403	582	1.583
6	500	404		1.593

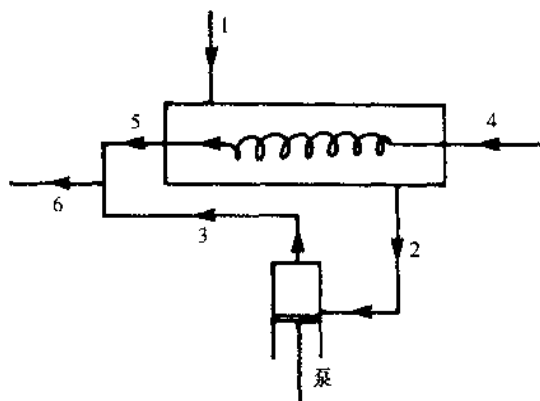


图 8-9

解 (a) 记 $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \alpha$, $\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \beta$, 假设沿着 1245 路线没有热量损失, $-\alpha h_1 + \alpha h_2 - \beta h_4 + \beta h_5 = 0$, 则

$$\beta/\alpha = (h_2 - h_1)/(h_5 - h_4) = (976 - 536)/(582 - 362) = 2/1$$

(b) 在 356 路线上, $\alpha h_3 + \beta h_5 = (\alpha + \beta) h_6$, 则

$$h_6 = (1/3)h_3 + (2/3)h_5 = (1/3)(584) + (2/3)(582) = 583 \text{ kJ/kg}$$

- 8.67^D 图 8-9 表示某水蒸气循环的一部分, 表 8-4 列出了水蒸气的性质。(a) 求沿着路线 4→5→6 的质量流量与沿着路线 1→2→3→6 质量流量的比。(b) 在点 6 处的焓是多少 (kJ/kg)?

表 8-4

状态	P/psia	$T/^{\circ}\text{F}$	$h/(\text{Btu/lb}_m)$	$s/(\text{Btu/lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R})$
1	800	450	430.4	0.627
2	800	350	322.8	0.502
3	8000	360	350.2	0.500
4	8000	175	161.9	0.246
5	8000	355	340.1	0.494
6	8000	360		0.498

解 (a) $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \alpha$, $\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \beta$, 假设沿着路线 1245 没有热量损失, 则

$$-\alpha h_1 + \alpha h_2 - \beta h_4 + \beta h_5 = 0$$

所以 $\beta/\alpha = (h_1 - h_2)/(h_5 - h_4) = (430.4 - 322.8)/(340.1 - 161.9) = 0.60$

(b) 在 356 路线上, $\alpha h_3 + \beta h_5 = (\alpha + \beta) h_6$, 则

$$h_6 = (1/1.6)h_3 + (0.6/1.6)h_5 = (1/1.6)(350.2) + (0.6/1.6)(340.1) = 345.4 \text{ Btu/lb}_m$$

- 8.68^D 某兰金循环的工质是水蒸气, “高”温和“高”压分别为 500K 和 35bar, “低”压为 1bar, 计算循环中水泵的功 (kJ/kg)。

解

$$\begin{aligned} w_p &= v_f (P_2 - P_1) \\ &= (1.043 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}) [(3500 - 100) \text{ kPa}] \\ &= 3.5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

- 8.69^D 某兰金循环的工质是水蒸气, “高”温和“高”压分别为 400°F 和 500psia, “低”压为 5psia, 计算循环中水泵的功 (kJ/kg)。

解

$$\begin{aligned} w_p &= v_f (P_2 - P_1) \\ &= (0.0164 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) [(500 - 5) \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2] / (778.16 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 1.502 \text{ Btu/lb}_m \end{aligned}$$

- 8.70 假如你买了一台蒸汽发动机, 这台发动机的工作原理是兰金循环, 循环中各个设备的

效率是 100%，工作于压强为 1bar 的冷凝器和压强为 20bar 的蒸发器之间，而事实证明你买了一个不中用的东西：水泵的实际等熵效率为 50%，蒸发器的实际效率为 80%，你决定使用过热方法将实际输出的净功提高到理想循环所能达到的数值，那你必须将水蒸气过热达到多高温(K)从而达到期望的输出功。

解 按图 8-2 中的数据，对理想循环有

$$h_1 = 417.5 \text{ kJ/kg} \quad v_f = 1.043 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

理想的水泵功

$$w_{ps} = v_f(P_2 - P_1) = (1.043 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})[(2000 - 100) \text{ kPa}] = 2.0 \text{ kJ/kg}$$

在点 4，

$$s_4 = s_3 = (20 \text{ bar 时的 } s_g) = 6.338 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

因而

$$6.338 = (1 - x_1)(1.303) + x_1(7.360)$$

则

$$x_1 = 0.8313$$

$$h_4 = (1 - 0.8313)(417.5) + (0.8313)(2675) = 2294 \text{ kJ/kg}$$

等熵膨胀产生的功 $w_{es} = h_1 - h_4 = 2798 - 2294 = 504 \text{ kJ/kg}$ 。理想的净输出功 $w_{net,s} = w_{es} - w_{ps} = 504 - 2 = 502 \text{ kJ/kg}$ 。这就是利用过热使实际发动机产生的功。

对实际发动机，水泵的功 $w_{ps} = w_{ps}/\eta_p = 1.982/0.50 = 4.0 \text{ kJ/kg}$ ，因为净功必须是 502 kJ/kg ，所以实际汽轮机的输出功一定是 $502 + 4 = 506 \text{ kJ/kg}$ 。因为实际汽轮机的等熵效率为 80%，等熵膨胀输出功

$$w_{es} = w_{ps}/\eta_p = 506/0.80 = 632.5 \text{ kJ/kg}$$

由莫雷图很容易找出给水加热器必须达到的温度。如果表中的数据可以采用的话，我们可以做多种尝试。

作为第一种猜想，如果水蒸气过热温度为 650K，在 20bar 时， $h_3 = 3198 \text{ kJ/kg}$ ， $s_3 = 7.053 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

等熵膨胀后，点 4 有 $s_4 = 7.053 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ，1bar，温度在 370~380K 之间，因为 7.053 比 1bar 时的 s_g 值 ($7.360 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$) 小，所以此时的状态为气液混合态，

$$x_4 = (7.053 - 1.303)/(7.360 - 1.303) = 0.9493$$

$$h_4 = (1 - 0.9493)(417.5) + (0.9493)(2675) = 2561 \text{ (kJ/kg)}$$

得到

$$w_{es} = 3198 - 2561 = 637 \text{ kJ/kg}$$

这个值比我们所期望的值 (632.5 kJ/kg) 大一点，这就说明我们一开始的假设已经非常接近了。表中列出的第二低的温度为 600K，这时 $s_3 = 6.875 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ， $h_3 = 3087 \text{ kJ/kg}$ 。得到

$$x_4 = (6.875 - 1.303)/(7.360 - 1.303) = 0.9199$$

$$h_4 = (1 - 0.9199)(417.5) + (0.9199)(2675) = 2494 \text{ kJ/kg}$$

依次得到

$$w_{es} = 3087 - 2494 = 593 \text{ kJ/kg}$$

与期望值相比，这个值相当低，由线性插入法得

$$T_3 = 600 + [(632.5 - 593)/(637 - 593)](50) = 645 \text{ K}$$

- 8.71^D** 200bar, 800K 的水蒸气在效率稍低的汽轮机内膨胀为 20bar 的饱和蒸汽，然后在 20bar 下又加热达 650K，接着又在效率稍低的汽轮机内膨胀为 2bar 的饱和蒸汽。(a) 在 T - s 图上画出这个循环，用连续的 1, 2, 3, 4 标记各点。(b) 第一个汽轮机的效率是多少(%)？(c) 第二个汽轮机的效率是多少(%)？

解 (a) 如图 8-10。

(b) 在点 1， $h_1 = 3325 \text{ kJ/kg}$ ， $s_1 = 6.252 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。如果汽轮机的效率为 100%，膨胀到 20bar 时， $s_2 = s_1 = 6.252 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。因为在 20bar 时， $s_g = 6.341 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ，所以膨胀后的水蒸气是气液混合体，

$$6.252 = (1 - x_{2s})(2.447) + x_{2s}(6.338)$$

则 $x_{2s} = 0.9779$ ，这样

$$h_{2s} = (1 - 0.9779)(908.6) + (0.9779)(2798) = 2756 \text{ kJ/kg}$$

第一次等熵膨胀产生的功

$$w_{e1s} = h_1 - h_{2s} = 3325 - 2756 = 569 \text{ kJ/kg}$$

因为实际膨胀后为 20bar 的饱和蒸汽，

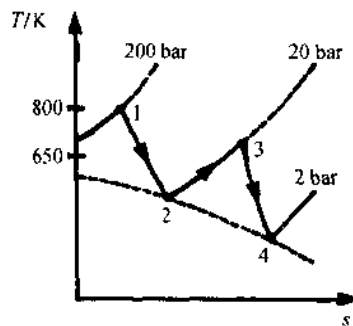


图 8-10

$$h_{2a} = (20\text{bar 时的 } h_g) = 2798\text{kJ/kg}$$

所以

$$w_{1a} = h_1 - h_{2a} = 3325 - 2798 = 527\text{kJ/kg}$$

第一个汽轮机的效率为

$$w_{1a}/w_{1s} = 527/569 = 0.9262 = 92.6\%$$

(c) 点 3,

$$h_3 = 3198\text{kJ/kg} \quad s_3 = 7.053\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$$

如果汽轮机的效率为 100%, 则膨胀到 2bar 时, $s_4 = s_3 = 7.053\text{kJ/kg}$, 又因为 2bar 时的 $s_g = 7.127\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$, 点 4 又是气液混合态,

$$7.053 = (1 - x_4)(1.530) + x_4(7.127)$$

则

$$x_4 = 0.9868$$

这样,

$$h_4 = (1 - 0.9868)(504.7) + (0.9868)(2706) = 2677\text{kJ/kg}$$

第二次等熵膨胀产生的功 $w_{2s} = h_3 - h_4 = 3198 - 2677 = 521\text{kJ/kg}$, 实际膨胀后为 2bar 的饱和蒸汽.

$$h_{4a} = (2\text{bar 时的 } h_g) = 2706\text{kJ/kg}$$

因而

$$w_{2a} = h_3 - h_{4a} = 3198 - 2706 = 492\text{kJ/kg}$$

第二个汽轮机的效率为

$$w_{2a}/w_{2s} = 492/521 = 0.9443 = 94.4\%$$

- 8.72^D 3000psia, 1000°F 的水蒸气在效率稍低的汽轮机内膨胀为 300psia 的饱和蒸汽, 然后在 300psia 下加热至 700°F, 最后在效率稍低的汽轮机内膨胀为 30psia 的饱和蒸汽. (a) 第一个汽轮机的效率是多少(%)? (b) 第二个汽轮机的效率是多少(%)?

解 如图 8-10. (a) 初始条件, $s = 1.497\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, $h_1 = 1440\text{Btu/lb}_m$, 等熵膨胀后, $s_2 = s_1 = 1.497\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 这个值小于 30psia 时的 s_g , 将表 A3 中与 20psia 和 40psia 对应的数值平均, 发现 $s_g = 1.706$, $s_f = 0.364\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 因而 $1.497 = (1 - x_2)(0.364) + x_2(1.706)$, 则 $x_2 = 0.8443$, 从而得到

$$h_{2s} = (1 - 0.8443)(2.63) + (0.8443)(1163) = 1015.6\text{Btu/lb}_m$$

$$w_{1s} = h_1 - h_{2s} = 1440 - 1016 = 424\text{Btu/lb}_m$$

事实上, 水蒸气在第一个汽轮机内膨胀为 300psia 的饱和蒸汽, 在这样的条件下

$$h_{2a} = (300\text{psia 时的 } h_g) = 1203\text{Btu/lb}_m$$

因此

$$w_{1a} = h_1 - h_{2a} = 1440 - 1203 = 237\text{Btu/lb}_m$$

效率则为

$$w_{1a}/w_{1s} = 237/424 = 0.5590 = 55.9\%$$

(b) 点 3,

$$h_3 = 1368\text{Btu/lb}_m \quad s_3 = 1.675\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

等熵膨胀后, $s_4 = s_3 = 1.675\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$. 这个值比 3psia 时的 $s_g = 1.899\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 小, 因而

$$1.675 = (1 - x_4)(0.194) + x_4(1.899), \text{ 则 } x_4 = 0.8686,$$

$$h_{4s} = (1 - 0.8686)(106.3) + (0.8686)(1121) = 987.6\text{Btu/lb}_m$$

$$w_{2s} = 1368 - 988 = 380\text{Btu/lb}_m$$

事实上, 水蒸气在第二个汽轮机内膨胀为 30psia 的饱和蒸汽, 在这个条件下

$$h_{4a} = (30\text{psia 时的 } h_g) = 1163\text{Btu/lb}_m$$

$$\text{由 } w_{2a} = h_3 - h_{4a} = 1368 - 1163 = 205\text{Btu/lb}_m$$

得效率为

$$w_{2a}/w_{2s} = 205/380 = 0.5395 = 54.0\%$$

- 8.73^D 分别用(a)水和(b)氟里昂(R12)作为工作物质, 比较兰金循环的性能, 此循环在 1~10bar 之间工作. 计算(i)锅炉内需要的具体能量(kJ/kg). (ii)冷凝器放出的具体能量(kJ/kg). (iii)如果水泵等熵效率为 100%, 水泵中需要的具体能量(kJ/kg). (iv)如果汽轮机的等熵效率为 100%, 汽轮机输出的功的具体数值(kJ/kg). (v)循环热效率(%).

解 (a) 按图 8-2 中的符号标注系统, $h_1 = 417.5\text{kJ/kg}$

$$h_2 = h_1 + w_2 = h_1 + v_1(P_2 - P_1)$$

$$= 417.5 + (1043 \times 10^{-3})(1000 - 100) = 418.4\text{kJ/kg}$$

$$h_3 = (10\text{bar 时的 } h_g) = 2777\text{kJ/kg}$$

等熵膨胀后,

$$s_4 = s_3 = 6.584\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$$

因而 $6.584 = (1 - x_4)(1.303) + x_4(7.360)$, 则

$$x_4 = 0.8719$$

$$h_4 = (1 - 0.8719)(417.5) + (0.8719)(2675) = 2386 \text{ kJ/kg}$$

因此

$$(i) \quad q_h = h_3 - h_2 = 2777 - 418 = 2359 \text{ kJ/kg}$$

$$(ii) \quad q_c = h_4 - h_1 = 2386 - 418 = 1968 \text{ kJ/kg}$$

$$(iii) \quad w_p = w_2 = 0.9 \text{ kJ/kg}$$

$$(iv) \quad w_e = h_3 - h_4 = 2777 - 2386 = 391 \text{ kJ/kg}$$

$$(v) \quad \eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (1968/2359) = 16.5\%$$

$$(b) \quad h_1 = 372.1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + w_2 = h_1 + v_{f1}(P_2 - P_1)$$

$$= 372.1 + (6.719 \times 10^{-4})(1000 - 100) = 372.7 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = (10 \text{ bar 时的 } h_g) = 569.0 \text{ kJ/kg}$$

等熵膨胀后, $s_4 = s_3 = 4.544 \text{ kJ/kg}$, 因而

$$4.544 = (1 - x_4)(3.893) + x_4(4.576)$$

则

$$x_4 = 0.9531$$

$$h_4 = (1 - 0.9531)(372.1) + (0.9531)(538.2) = 530.5 \text{ kJ/kg}$$

$$(i) \quad q_h = h_3 - h_2 = 569.0 - 372.7 = 196.3 \text{ kJ/kg}$$

$$(ii) \quad q_c = h_1 - h_4 = 530.5 - 372.1 = 158.4 \text{ kJ/kg}$$

$$(iii) \quad w_p = w_2 = 0.6 \text{ kJ/kg}$$

$$(iv) \quad w_e = h_3 - h_4 = 569.0 - 530.5 = 38.5 \text{ kJ/kg}$$

$$(v) \quad \eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (158.4/196.3) = 19.3\%$$

8.74^D 分别用(a)水和(b)氟里昂 R12 作为工作物质, 比较兰金循环的性能, 此循环在 15 和 150psia 之间工作, 估计(i)锅炉内需要的比能(Btu/lb_m), (ii)冷凝器放出的比能(Btu/lb_m), (iii)如果水泵等熵效率为 100%, 水泵需要做的比功(Btu/lb_m), (iv)如果汽轮机等熵效率为 100%, 汽轮机输出的比功(Btu/lb_m), (v)循环热效率(%).

解 (a) 使用图 8-2 中的符号, 根据表中给出的对应于 14.7 和 20psia 的数据内推得出

$$h_1 = 181.1 \text{ Btu/lb}_m$$

$$h_2 = h_1 + w_2 = h_1 + v_{f1}(P_2 - P_1)$$

$$= 181.1 + (0.0167)[(150 - 15) \times 144]/778 = 181.5 \text{ Btu/lb}_m$$

$$h_3 = (150 \text{ psia 时的 } h_g) = 1195 \text{ Btu/lb}_m$$

等熵膨胀后,

$$s_4 = s_3 = 1.570 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

因此

$$1.570 = (1 - x_4)(0.313) + x_4(1.756)$$

由 s_f 和 s_g 数值内插得到与 15psia 对应的值, 解得

$$x_4 = 0.8711$$

$$h_4 = (1 - 0.8711)(181.1) + (0.8711)(1151) = 1026 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(i) \quad q_h = h_3 - h_2 = 1195 - 182 = 1013 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(ii) \quad q_c = h_4 - h_1 = 1026 - 181 = 845 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(iii) \quad w_p = w_2 = 0.4 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(iv) \quad w_e = h_3 - h_4 = 1195 - 1026 = 169 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(v) \quad \eta = 1 - (q_c/q_h) = 1 - (845/1013) = 16.7\%$$

$$(b) \quad h_1 = 4.08 \text{ Btu/lb}_m$$

$$h_2 = h_1 + w_2 = h_1 + v_{f1}(P_2 - P_1) = 4.08 + (0.01078)[(150 - 15) \times 144]/778 = 4.35 \text{ Btu/lb}_m$$

$$h_3 = (150 \text{ psia 时的 } h_g) = 87.30 \text{ Btu/lb}_m$$

等熵膨胀, $s_4 = s_3 = 0.1628 \text{ Btu/lb}_m$, 因此

$$0.1628 = (1 - x_4)(0.0094) + x_4(0.1711),$$

$$x_4 = 0.9487$$

$$(i) \quad q_h = h_3 - h_2 = 87.80 - 4.35 = 83.4 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(ii) \quad q_c = h_4 - h_1 = 71.39 - 4.08 = 67.31 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(iii) \quad w_p = w_2 = 0.27 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(iv) \quad w_r = h_3 - h_4 = 87.80 - 71.39 = 16.41 \text{ Btu/lb}_m$$

$$(v) \quad \eta = 1 - (q_c / q_h) = 1 - (67.31 / 83.45) = 19.3\%$$

8.75^p 在题 8.73 中, (a) 哪种液体循环效率(%) 高些? (b) 与同温限的卡诺循环相比, 哪种液体循环的效率高?

解 (a) 根据计算结果, $\eta_{H_2O} = 0.1653$, $\eta_{R12} = 0.1931$, 因此 R12 循环热效率高.

(b) 对于在 372.8K 和 453.1K 之间工作的卡诺循环来说, 对应的水蒸气冷凝器和锅炉的压强分别为 1bar 和 10bar, $\eta^* = 1 - (T_c / T_h) = 1 - (372.8 / 453.1) = 0.1772$, 蒸汽循环效率是同温限卡诺循环效率的 $0.1653 / 0.1772 = 93.3\%$; 另一方面, 如果卡诺循环在 243.0K 和 314.9K 之间工作, 对应的 R12 冷凝器和锅炉的压强分别为 1bar 和 10bar, $\eta^* = 1 - (T_c / T_h) = 1 - (243.0 / 314.9) = 0.2283$, R12 循环效率是同温限卡诺循环效率的 $0.1931 / 0.2283 = 84.6\%$. 因此与同温限的卡诺循环相比使用水蒸气能提高效率.

8.76^p 在题 8.74 中, (a) 哪种液体循环热效率较高? (b) 与同温限的卡诺循环相比, 哪种液体循环效率较高?

解 (a) 由计算结果, $\eta_{H_2O} = 0.1668$, $\eta_{R12} = 0.1934$, 可知 R12 循环热效率较高.

(b) 在 212.9°F 和 358.4°F 之间工作的卡诺循环, 对应的蒸汽冷凝器和锅炉压强分别为 15 和 150psia, $\eta^* = 1 - (T_c / T_h) = 1 - (672.6 / 818.1) = 0.1779$, 因此蒸汽循环热效率是同温限的卡诺循环效率的 $0.1668 / 0.1779 = 93.80\%$. 另一方面, 卡诺循环在 -20.8°F 和 109.5°F 之间工作, 对应的 R12 冷凝器和锅炉压强分别是 15psia 和 150psia, $\eta^* = 1 - (T_c / T_h) = 1 - (438.9 / 569.2) = 0.2289$, 所以 R12 循环效率是同温限卡诺循环效率的 $0.1934 / 0.2289 = 84.5\%$. 因此与同温限的卡诺循环相比, 使用水蒸气能提高效率.

8.77 压强为 40bar 的水蒸气(点 1)等压加热到 600K(点 2), 然后等容放热至 450K(点 3). (a) 在 $P-v$ 图上画出 1→2 和 2→3 这两个近似平衡过程; (b) 对于这两个过程, 计算出其中热量的交换值(kJ/kg)、功(kJ/kg)以及熵变(kJ/kg·K); (c) 如果 $P-v$ 图上 3→1 过程曲线是一条直线, 这个过程中热量交换值 ${}_3q_1$ 和功 ${}_3w_1$ 是多少? 假设此系统是一个封闭系统.

解 查表 A4 得, 点 1,

$$\begin{aligned} v_1 &= 0.0256 \text{ m}^3/\text{kg}, & v_f &= 1.252 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \\ v_g &= 0.0498 \text{ m}^3/\text{kg}, & v_f &< v_1 < v_g \end{aligned}$$

所以点 1 的状态是二相混合态.

$$v_{\text{mix}} = 0.0256 = (1 - x_1)(0.001252) + x_1(0.0498), \quad x_1 = 0.5010$$

由此得,

$$h_1 = (1 - 0.5010)(1087.3) + (0.5010)(2801) = 1946 \text{ kJ/kg}$$

$$u_1 = (1 - 0.5010)(1082.3) + (0.5010)(2602) = 1844 \text{ kJ/kg}$$

$$s_1 = (1 - 0.5010)(2.797) + (0.5010)(6.069) = 4.437 \text{ kJ/kg}$$

在 40bar, 600K 时, 水蒸气处于过热状态,

$$h_2 = 3036 \text{ kJ/kg}, \quad s_2 = 6.490 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\text{内能} \quad u_2 = h_2 - P_2 v_2 = 3036 - (4000)(0.0630) = 2784 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{点 3,} \quad v_3 = v_2 = 0.0630 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad T_3 = 450 \text{ K}$$

根据表 A2 中的数值, 状态 3 显然是气液混合态, 根据表中给出的 440K 和 460K 之间的数据, 采用线性插入法, 得

$$v_{\text{mix}} = 0.0630 = (1 - x_3)(0.001124) + x_3(0.214)$$

则 $x_3 = 0.2906$, 由此得

$$h_3 = (1 - 0.2906)(749.4) + (0.2906)(2773) = 1337 \text{ kJ/kg}$$

$$u_3 = (1 - 0.2906)(748.4) + (0.2906)(2580) = 1281 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = (1 - 0.2906)(2.208) + (0.2906)(6.609) = 3.487 \text{ kJ/kg}$$

结果如表 8-5.

表 8-5

点	P/bar	$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	T/K	x	$h/(\text{kJ}/\text{kg})$	$u/(\text{kJ}/\text{kg})$	$s/(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})$
1	40	0.0256	523.5	0.501	1946	1844	4.437
2	40	0.0630	600.0		3036	2784	6.490
3	9.319	0.0630	450.0	0.291	1337	1281	3.487

(a) 循环如图 8-11.

(b) $1 \rightarrow 2$: ${}_1q_2 + {}_1w_2 = u_2 - u_1$

$$\begin{aligned} \text{而: } {}_1w_2 &= - \int_1^2 P dv \\ &= -(400 \text{ kPa})[(0.0630 - 0.0256) \text{ m}^3/\text{kg}] \\ &= -149.6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$u_2 - u_1 = 2784 - 1844 = 940 \text{ kJ/kg}$$

因此, ${}_1q_2 = 940 - (-149.6) = 1089.6 \text{ kJ/kg}$ $2 \rightarrow 3$, ${}_2w_3 = 0$ 因此 ${}_2q_3 = u_3 - u_2 = 1281 - 2784 = -1503 \text{ kJ/kg}$

$$\begin{aligned} \text{(c) } 3 \rightarrow 1: {}_3w_1 &= -\bar{P} \Delta v = -[(1/2)(P_3 + P_1)](v_1 - v_3) \\ &= -[(1/2)(4931.9)](0.0256 - 0.0630) \\ &= 92.2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\Delta u = u_1 - u_3 = 1844 - 1281 = 563 \text{ kJ/kg}$$

$${}_3q_1 = \Delta u - {}_3w_1 = 563 - 92.2 = 470.8 \text{ kJ/kg}$$

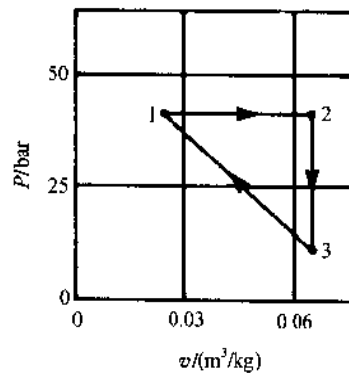


图 8-11

第九章 湿度测量

基本注释

题 9.1~9.9 涉及干球温度为 24°C , 总压强为 1.0133bar (1atm) 和相对湿度为 50% 的湿空气. 附录 F 中的图表可用于求解本章的各类题目. 要特别注意表 F1 中的各类名词与公式.

9.1^D 求湿球温度($^{\circ}\text{C}$).

解 在图 F5 中, 找到给定干球温度所在的竖直线, 沿线向上移动与标有“50%相对湿度”的曲线相交, 该交点在图上已用圆圈标出. 现从该点出发, 沿图中倾斜直线向左上方移动, 直至与“湿球或饱和温度”曲线边界相交. 从曲线边界的标度可读出湿球温度为 17.0°C .

9.2^D 求露点温度($^{\circ}\text{C}$).

解 从题 9.1 中的圆圈点出发, 沿水平直线向左移动, 与“湿球或饱和温度”曲线边界相交. 从曲线边界标度可读出露点温度约为 13°C .

9.3^D 求含湿量(或比湿度) ω .

解 从题 9.1 中的圆圈点出发, 沿水平直线向右移动, 与竖直“含湿量”标度线相交, 读出数值为 $0.0094\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg da}$. (注: $\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg da} = \text{kgH}_2\text{O}/\text{kg}(\text{da 即干空气})$ 以下同.) [严格地说, 作为质量比, 含湿量是不需要单位的纯数.]

9.4^D 求湿空气的焓(kJ/kg).

解 从题 9.1 中的圆圈点出发, 沿倾斜直线向左上方移动, 与锯齿状的“饱和焓值”坐标相交, 读出数值为 $47.9\text{kJ}/\text{kg da}$. (这种近似的有效性, 参见 9.13 和 9.23 题.)

9.5^D 求湿空气中水蒸气的压强(分压强).

解 有些空气湿度图中有水蒸气压强的内插表格或额外标尺, 但图 5 中没有. 可由 $P_v = \phi P_g = (0.50)P_g$ 得到. 从表 F3 可知 $P_g = 0.02985\text{bar}$, 故 $P_v = (0.50)(0.02985) = 0.01493\text{bar}$.

9.6^D 不参照饱和蒸汽压求湿空气中的水蒸气分压(bar).

解 题 9.3 给出含湿量 ω , 因此, $P_v = \omega P / (\omega + 0.6220) = (0.0094)(1.0133) / (0.0094 + 0.6220) = 0.01509\text{bar}$. 与题 9.5 结果相差 0.0016bar , 相对误差为 1%.

9.7^D 求湿空气中的空气分压(bar).

解 对于混合理想气体(分子间作用力为零), 道尔顿定律指出每种成分就如单独存在一样起作用, 因而总压强是分压强的总和. 现在湿空气中空气温度远高于临界温度, 气压远低于临界气压, 故可认为是理想气体. 而水蒸气温度虽远低于临界温度, 但其气压是如此低, 因而也可将其视为理想气体. 所以, $P_a = P - P_v = 1.0133 - 0.0150 = 0.9983\text{bar}$. (P_v 取值于题 9.5 和 9.6)

9.8^D 求湿空气的饱和度(μ).

解 题 9.5 和 9.7 已给出 P_g 和 P_a , $\mu = (P - P_g)\phi / P_a = (1.0133 - 0.0299)(0.50) / 0.9983 = 0.4925$. 由于 $P_g \approx 0$ 和 $P_a \approx P$, μ 非常接近于 ϕ .

9.9^D 用另外的公式检验题 9.8.

解 利用题 9.3 得到的 ω , $\mu = 0.50 - (0.0094 / 0.6220)(1 - 0.50) = 0.4924$

该公式说明, 当含湿量与 0.6220 相比是小量时, μ 从下方趋近于 ϕ .

题 9.10~9.18 涉及干球温度为 80°F , 相对湿度 50% 和总压强为 14.70psia 的湿空气, 可应用图 F4 和表 F2.

9.10^D 求湿球温度($^{\circ}\text{F}$).

解 在图 F5 中, 找到给定干球温度所在的竖直线, 沿线向上移动, 与标有“50%相对湿度”的倾

斜曲线相交。交点已在图中标出。现从该点出发,沿图中倾斜直线向左上方移动,直至与“湿球,露点或饱和温度”边界相交,从边界曲线标度上读出湿球温度约为 66.7°F 。

9.11^D 求露点温度($^{\circ}\text{F}$)。

解 从题 9.10 的标记点出发,沿水平方向向左移动,直至交于相同的“湿球,露点或饱和温度”边界曲线,从边界曲线标度上读出露点温度为 59.6°F 。

9.12^D 求含湿量(或比湿度) ω 。

解 从题 9.10 的标记点出发,沿水平方向向右移动,与标有“每磅干空气的含湿量(格令, grain)”[格令是英制质量单位, $1\text{ grain}=64.8\text{ mg}$]和“每磅干空气的含湿量(磅, lb_m)”的竖直标度线相交,读出数值: $76.8\text{ grains H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{ da}$ 和 $0.011\text{ lb}_m\text{ H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{ da}$ 。(注: $\text{lb}_m\text{ H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{ da}=\text{lb}_m\text{ H}_2\text{O}/\text{lb}_m$ (干空气))。这些数值在折合变换 $1\text{ lb}_m=7000\text{ grains}$ 下是等价的。尽管如此,只有无量纲数 0.011 可用于湿度计算公式中。

9.13^D 求湿空气的焓(Btu/lb_m)。

解 从题 9.10 标记点出发,沿等焓线向左上方移动,越过饱和边界线,与锯齿状的焓值刻度线相交,读得饱和焓值 $31.5\text{ Btu}/\text{lb}_m$ 。由于焓值随含湿量的变化很小,这可作为真实湿空气焓值的较好的近似。请与题 9.23 相比较。

9.14^D 求湿空气中水蒸气的分压。

解 从表 F2, 80°F 下 $P_g=0.50737\text{ psia}$, 则 $P_v=\phi P_g=(0.50)(0.50737)=0.2537\text{ psia}$ 。

9.15^D 用另外的方法检验题 9.14 的结果。

解 利用题 9.12 求得的 ω , 有 $P_v=\omega P/(\omega+0.622)=(0.011)(14.70)/(0.011+0.622)=0.255\text{ psia}$ 。(用这种方法确定的数值,受从图中读取 ω 的精度限制。)

9.16^D 求湿空气中空气的分压(psia)。

解 假定可用道尔顿定律(参见题 9.7),并利用题 9.14 和 9.15 的结果,有 $P_a=P-P_v=14.70-0.25=14.45\text{ psia}$ 。

9.17^D 计算湿空气的饱和度(μ)。

解 利用已知的 P_a 和 P_v 数值(参见题 9.14 和 9.15),可得

$$\mu=[(P-P_g)/(P-P_v)]\phi=[(14.70-0.5)/(14.70-0.25)](0.50)=0.491$$

9.18^D 用另外有关 μ 的公式检验题 9.17。

解 由题 9.12 得 $\omega=0.011$, 所以

$$\mu=\phi-(\omega/0.622)(1-\phi)=0.50-(0.011/0.622)(1-0.50)=0.491$$

9.19^D 一湿空气,其干球温度为 24°C ,相对湿度为 50% ,总压强为 1.013 bar ,试从表 F3 求取尽可能多的性质。

解 (i) 在 24°C , $P_g=0.029850\text{ bar}$, 因此,

$$P_v=\phi P_g=(0.50)(0.029850)=0.01493\text{ bar}$$

(ii) 空气的分压强为总压强减去水蒸气的分压,即

$$1.0133-0.0149=0.9984\text{ bar}$$

(iii) 含湿量

$$\omega=0.622P_v/(P-P_v)=(0.622)(0.01493)/(1.0133-0.0149)=9.301\times 10^{-3}$$

(iv) 露点温度,即 $P_v=P_g$ 的温度。由于 P_v 已经求得是 0.01493 bar , 饱和蒸汽压表明露点温度应略低于 13°C , 经线性插值

$$T_w=12+[(0.01493-0.01403)/(0.01498-0.01403)](1)=12.95^{\circ}\text{C}$$

(v) 湿空气的焓 $h_{\text{max}}=h_a+\omega h_v$ 。在 24°C , h_a 为 24.146 , h_v 为 $h_g=2544.5$, 而 $\omega=0.0093$, 因此,

$$h_{\text{max}}=24.146+(0.0093)(2544.5)=47.81\text{ kJ/kg}$$

9.20^D 一湿空气,其干球温度为 80°F ,相对湿度为 50% ,总压强为 14.70 psia ,试从表 F2 确定尽可能多的性质。

解 (i) 在 80°F , $P_g=0.50737\text{ psia}$, 因此,

$$P_v = \phi P_g = (0.50)(0.50737) = 0.2537 \text{ psia}$$

(ii) 空气的分压强为总压强减去水蒸气的分压强, 即

$$14.70 - 0.25 = 14.45 \text{ psia}$$

(iii) 含湿量

$$\omega = 0.622 P_v / P_a = (0.622)(0.2537) / 14.45 = 0.0109$$

(iv) 露点(即饱和)温度为 $P_v = P_g$ 的温度。因 P_v 已经求得是 0.2537 psia, 饱和温度必然是略低于 60°F, 经线性插值:

$$T_w = 59 + [(0.2537 - 0.2474) / (0.2564 - 0.2474)](1) = 59.70^\circ\text{F}$$

(v) 湿空气的焓 $h_{\text{mix}} = h_a + \omega h_v$ 。80°F 时, h_a 为 19.22 Btu/lb_m, h_v 值为 $h_g = 1096.1$ Btu/lb_m, 而 $\omega = 0.0109$, 因此, $h_{\text{mix}} = 19.22 + (0.0109)(1096.1) = 31.17$ Btu/lb_m。

9.21^D 对题 9.19 的湿空气, 试用表 F1 中的经验公式求取尽可能多的性质。

解 干球温度下的饱和蒸汽压可用双常数公式计算:

$$\lg P_g = 14.43509 - 5333.3 / T_d = 14.43509 - 5333.3 / 297.15 = -3.51308$$

即 $P_g = 0.02980$ bar, 如用三常数公式计算:

$$\lg P_g = 12.19286 - 4109.1 / (297.15 - 35.50) = -3.51171$$

即 $P_g = 0.02985$ bar, 已知 P_g , 可求得

$$P_v = \phi P_g = (0.50) P_g = 0.01490 \text{ 或 } 0.01493 \text{ bar}$$

而 $\omega = (0.622) P_v / (P - P_v) = (0.622) P_v / (1.0133 - P_v) = 9.283 \times 10^{-3}$ 或 9.302×10^{-3}

湿空气的焓是 $h_{\text{mix}} = h_a + \omega h_v$, 空气的焓可求得为

$$h_a = (1.005) T = (1.005)(24) = 24.12 \text{ kJ/kg} \quad \text{或} \quad h_a = (1.006) T = (1.006)(24) = 24.14 \text{ kJ/kg}$$

$$24^\circ\text{C} \text{ 时饱和水蒸气的焓为 } h_v = h_g = 2501 + 1.83 T = 2501 + 1.83(24) = 2545.0 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{所以 } h_{\text{mix}} = 24.12 + \omega(2545.0) = 47.49 \quad \text{或} \quad 47.81 \text{ kJ/kg}$$

露点温度 T_w 是 $P_g = P_v = 0.01490$ 或 0.01493 bar 时的温度。取 $P_g = 0.01490$, 则双常数公式成为 $-4.20639 = 14.43509 - 5333.3 / T_w$, 故 $T_w = 286.10 \text{ K} = 12.95^\circ\text{C}$ 。如采用三常数公式, 可得到相同的数值(精确到两位小数)。

9.22^D 对题 9.20 的湿空气, 用表 F1 的经验公式求含湿量。

解 干球温度下水的饱和蒸汽压, 可从双常数公式 $\ln P_g = 17.01523 - 9549.5 / T_d$ 求得。对 $T_d = 539.69^\circ\text{R}$, 可得

$$\ln P_g = -0.67919 \quad \text{即} \quad P_g = 0.5070 \text{ psia}$$

若采用三常数公式, 则 $\ln P_g = 14.97156 - 7490.8 / 478.64 = -0.67862$, 故 $P_g = 0.5073$ psia。

因此, $P_v = \phi P_g = (0.50) P_g = 0.2533$ 或 0.2537 psia

而 $\omega = (0.622) P_v / (P - P_v) = (0.622) P_v / (14.70 - P_v) = 0.0109$

(两种方法都是此结果)

9.23 推导湿空气的绝热饱和方程。

解 只有在普通大气压下的空气-水蒸气混合物的湿球温度才非常接近于绝热饱和温度。事实上, 这种近似已在题 9.1 的求解中采用。

考虑图 9-1 示意的过程。未饱和湿空气从 1 进入混合室, 液态水从 3 进入。假定从 2 出来的空气是饱和的, 并假定没有热量从混合室传进传出, 且忽略动能、势能的变化, 则稳定流动的能量方程成为 $H_1 + H_3 = H_2$, 式中 $H_1 = \dot{m}_{a1} h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1}$, $H_3 = \dot{m}_3 h_{f3}$, $H_2 = \dot{m}_{a2} h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2}$ 。由于进入和离开混合室的空气质量相同, 可令 $\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = 1$ 和 $\dot{m}_v = \omega$, 则焓的守恒方程成为 $h_{a1} + \omega_1 h_{v1} + \dot{m}_3 h_{f3} = h_{a2} + \omega_2 h_{v2}$, 即

$$\omega_1 h_{v1} + \dot{m}_3 h_{f3} - \omega_2 h_{v2} = h_{a2} - h_{a1} \quad (1)$$

在水中混合的惟一效应就是将含湿量从入口的 ω_1 变为出口的 ω_2 , 它们的差就是 \dot{m}_3 , 即 $\omega_2 - \omega_1 = \dot{m}_3$ 。另一方面, 若出现热平衡, 则 $T_2 = T_3$, 将这些变化代入式(1), 可得

$$\omega_1 (h_{v1} - h_{f2}) + \omega_2 (h_{f2} - h_{v2}) = h_{a2} - h_{a1} \quad (2)$$

而 $h_{f2} - h_{v2} = -h_{fg2}$ 和 $h_{a2} - h_{a1} = c_p (T_2 - T_1)$, 所以

$$\omega_1 = (c_p (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{fg2}) / (h_{v1} - h_{f2}) \quad (3)$$

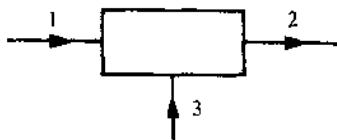


图 9-1

这就是热力学教程常用的方程形式。

正如 Obert 在他的《热力学概念》331 页所指出的那样,由于 $\omega_2 h_{f2}$ 这一项相对不太重要,若为饱和所加的水的温度与湿球温度相差较大,也并不会给空气的最终条件带来明显的变化。换句话说,出现热平衡的假定并不要很严格。

- 9.24^D 在 1.01325bar 下的湿空气,露点温度为 10°C,干球温度为 30°C,利用图 F5 确定:(a)湿球温度(°C);(b)含湿量;(c)水蒸气的分压(bar);(d)相对湿度(%);(e)湿空气的比焓(kJ/kg)。

解 按 (a) 按题 9.1 的求解步骤,求得 $T_w \approx 17.7^\circ\text{C}$ 。

(b) 按题 9.3 的求解步骤,求得 $\omega \approx 0.0076$ 。

(c) $P_v = \omega P / (0.6220 + \omega) = (0.0076)(1.01325) / (0.622 + 0.0076) = 0.0122\text{bar}$ 。(由于 ω 从图中只能读到二位数值,这里的第三位数字不重要。)

(d) 相对湿度可通过在湿度图上标示的 10%,20% 等相对湿度线之间的线性插值得到。因此,

$$\phi \approx 20 - (16.8/18.8)(10) = 28.9\%$$

(e) 按题 9.4 的步骤,求得 $h_{\text{mix}} \approx 49.8\text{kJ/kg}$ 。

- 9.25^D 在 14.70psia 下的湿空气,露点温度为 50°F,干球温度为 85°F,利用图 F4 确定:(a)湿球温度(°F);(b)含湿量;(c)水蒸气的分压(psia);(d)相对湿度(%);(e)湿空气的比焓(Btu/lb_m)。

解 按 (a) 按题 9.10 的求解步骤,求得 $T_w \approx 63.5^\circ\text{F}$ 。

(b) 按题 9.12 的求解步骤,求得 $\omega \approx 0.0076$ 。[与题 9.24(b) 比较,两题仅在干球温度上有一细小差别。]

(c) $P_v = \omega P / (0.6220 + \omega) = (0.0076)(14.70) / (0.6220 + 0.0076) = 0.1774\text{psia}$ 。(此结果可被舍入为 0.177psia)

(d) 相对湿度可由假定湿度图上两恒定相对湿度线之间是线性分度而得到。对本题,相对湿度点刚好略低于 30% 线。

(e) 按题 9.13 的求解步骤,求得 $h_{\text{mix}} \approx 29.0\text{Btu/lb}_m$ 。

- 9.26 利用表 F3 重解题 9.24。

解 各值的求解次序将与题 9.24 不同。

(c) 在 10°C,表中给出 $P_s = 0.012281\text{bar}$,因此,按露点的定义, $P_v = 0.012281\text{bar}$ 。

(b) $\omega_s = \omega = 0.00766\text{kgH}_2\text{O/kg da}$ 。

(d) 在 30°C, $P_s = 0.042455\text{bar}$,而 P_v 仍保持露点时的数值,因此,

$$\phi = P_v / P_s = 0.012281 / 0.042455 = 0.289 = 28.9\%$$

(e) $h_{\text{mix}} = h_a + \omega h_s = 30.185 + (0.00766)(2553.5) = 49.75\text{kJ/kg}$

(a) 湿球温度位于露点和干球温度之间,在此温度下,饱和湿空气的焓为 49.75kJ/kg,即 $h_a + \omega_s h_s = 49.75$ 。若假定为 20°C,则有

$$20.121 + (0.01476)(2537.2) = 57.570 \text{ (太高)}$$

假定为 15°C,则有

$$15.090 + (0.01069)(2528.0) = 42.114 \text{ (太低)}$$

以 18°C 作试验,则有

$$18.108 + (0.01299)(2533.5) = 51.018 \text{ (略高)}$$

经线性插值:

$$T_w = 15 + [(49.75 - 42.11) / (51.02 - 42.11)](3) = 17.6^\circ\text{C}$$

- 9.27^D 湿空气的总压强为 1.01325bar,干球温度为 30°C,湿球温度为 20°C。用图 F5 求:(a)相对湿度(%);(b)含湿量;(c)焓(kJ/kg)。

解 如图 9-2 所示,所求状态必须在干球温度所在的竖直线上同时也必在湿球温度所在的向右下方倾斜的斜线上。

(a) 从图 F5 可知,这两条线的交点几乎正好在 40% 的相对湿度线上。

(b) 从交点水平向右移动,交含湿量轴于 0.0107 处。

(c)从交点反向移动,越过 20℃ 湿球点,直至交于焓的标度轴,求得焓值为 57.6 kJ/kg。

- 9.28^D 湿空气的总压强为 1.01325 bar,干球温度为 30℃,湿球温度为 20℃,用表 F3 求:(a)相对湿度(%);(b)含湿量;(c)焓(kJ/kg);(d)水蒸气分压(bar)。

解 因为干球温度(30℃)下未饱和湿空气的焓必须等于湿球温度(20℃)下饱和湿空气的焓。将表中所给的空气和水蒸气的焓值与 ω_g 值联立求解,可确定湿空气的焓。所以,

$$(c) h_{\text{max}} = h_a + \omega_g h_g = 20.121 + (0.01476)(2537.2) = 57.570 \text{ kJ/kg, 而}$$

在 30℃, $57.570 = h_a + \omega h_g = 30.185 + \omega(2553.5)$, 解得

$$(b) \quad \omega = 0.01072$$

$$(d) \quad P_v = \omega P / (\omega + 0.622) = (0.01072)(1.01325) / (0.01072 + 0.6220) = 0.01717 \text{ bar}$$

$$(a) \quad \phi = P_v / P_g = 0.01717 / 0.04246 = 40.4\%$$

- 9.29^D 利用表 F1 的公式,重解题 9.28。

解 (d)要用 Carrier 方程求 P_v ,必须先求得 $P_{g,w}$ 。利用双常数方程,

$$\ln P_{g,w} = 14.43509 - (5333.3 / 293.15) = -3.75799 \quad \text{即} \quad P_{g,w} = 0.02333 \text{ bar}$$

利用三常数方程,

$$\ln P_{g,w} = 12.19286 - [4109.1 / (293.15 - 35.50)] = -3.75552 \quad \text{即} \quad P_{g,w} = 0.02339 \text{ bar}$$

将后者代入 Carrier 方程,得

$$P_v = 0.02339 - \frac{(1.01325 - 0.02339)(30 - 20)}{1555.6 - (0.7222)(20)} = 0.01697 \text{ bar}$$

(b)在湿球条件下, $P_v = P_{g,w} = 0.02339 \text{ bar}$, 因此, $\omega_w = 0.622 P_v / (P - P_v) = (0.622)(0.02339) / (1.01325 - 0.02339) = 0.01470$ 。此外, $h_{f,g,w} = h_{g,w} - h_{f,w} = 2501 + (1.83)(20) - (4.190)(20) = 2453.8 \text{ kJ/kg}$; $h_{g,w} = 2501 + (1.83)(30) = 2555.9 \text{ kJ/kg}$; $h_{f,w} = (4.190)(20) = 83.8 \text{ kJ/kg}$ 。则由绝热饱和和方程给出

$$\omega = \frac{1.005(20 - 30) + (0.01470)(2453.8)}{2555.9 - 83.8} = 0.01053$$

另一方面,由 Carrier 方程的求解结果($P_v = 0.01697 \text{ bar}$)给出 $\omega = (0.622) P_v / (P - P_v) = (0.622)(0.01697) / (1.01325 - 0.01697) = 0.01059$ 。取两者的平均值 $\omega = 0.01056$ 。

$$(d) \quad P_v = \omega P / (\omega + 0.622) = (0.01056)(1.01325) / (0.01056 + 0.6220) = 0.01691 \text{ bar}$$

$$(a) \quad \phi = P_v / P_g = 0.01691 / 0.04246 = 39.8\%$$

$$(c) \quad h_{\text{max}} = h_a + \omega h_g = (1.006)(30) + (0.01056)[2501 + (1.83)(30)] = 57.17 \text{ kJ/kg}$$

- 9.30^D 湿空气的总压强为 14.70 psia,干球温度为 90°F,湿球温度为 70°F。利用图 F4 求:(a)相对湿度(%);(b)含湿量;(c)焓(Btu/lb_m)。

解 所求状态必在干球温度(90°F)所在的竖线上,同时也必在湿球温度(70°F)所在的向右下方倾斜的等焓线上。如图 9-2 所示,可得一交点。

(a)假定线性插值有效,由交点查图得

$$\phi \approx 30 + (18/27)(10) = 36.7\%$$

(b)从交点向右水平移动至含湿量轴,得

$$\omega \approx 0.011, \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{ da}$$

(c)从交点反向移动,越过 70°F 湿球点,与焓的标度轴相交,求得

$$h = 34.07 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$$

- 9.31^D 湿空气的总压强为 14.70 psia,干球温度为 90°F,湿球温度为 70°F。试利用图 F2 求出尽可能多的湿空气特性。

解 湿空气在湿球条件下的焓和干球条件下的焓必须相同。在湿球条件($T_w = 70^\circ\text{F}$)下,

$$h_{\text{max}} = h_a + \omega_g h_g = 16.818 + (0.01577)(1091.8) = 34.036 \text{ Btu/lb}_m$$

在干球条件($T_d = 90^\circ\text{F}$)下,

$$h_a = 21.626, h_g = 1100.4 \text{ Btu/lb}_m$$

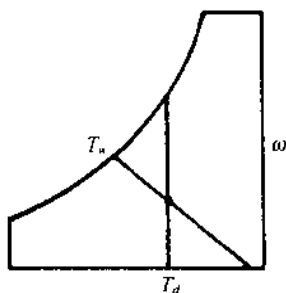


图 9-2

故 $34.036 = 21.626 + \omega(1100.4)$, 解得 $\omega = 0.01128$; 所以,

$$P_v = \omega P / (0.6220 + \omega) = (0.01128)(14.70) / (0.6220 + 0.0113) = 0.2618 \text{ psia}$$

即 $P_a = P - P_v = 14.70 - 0.26 = 14.44 \text{ psia}$.

相对湿度是干球温度下水蒸气分压与饱和蒸汽压之比, 由表知, $P_g = 0.69890 \text{ psia}$, 所以,

$$\phi = P_v / P_g = 0.2618 / 0.6989 = 37.5\%$$

9.32^D 利用 Carrier 方程(表 F1)重解题 9.31.

解 由于湿球和干球温度均已知, 故可用 Carrier 方程求干球温度下的分压. 首先, 用双常数蒸汽压方程得

$$\ln P_{gw} = 17.01523 - [9549.5 / (70 + 459.69)] = -1.01324 \quad \text{即} \quad P_{gw} = 0.3630 \text{ psia}$$

故 $P_v = 0.3630 - [(14.70 - 0.3630)(90 - 70)] / (2800 - 91) = 0.2571 \text{ psia}$

由此可得, $P_a = P - P_v = 14.70 - 0.2571 = 14.44 \text{ psia}$

$$\omega = (0.6220) P_v / P_a = (0.6220)(0.2571) / 14.44 = 0.01107; \quad \phi = P_v / P_g = 0.2571 / 0.6996 = 36.8\%$$

式中 P_g 由 $\ln P_g = 17.01523 - (9549.5 / 549.69) = -0.35729$ 求得. 最后, 焓为

$$h_{\text{mix}} = h_c + \omega h_g = (0.24027)(90) + (0.01107)[1061.7 + (0.43667)(90)] = 33.81 \text{ Btu/lb}_m$$

9.33^D 利用绝热饱和方程(表 F1)重解题 9.31.

解 在绝热饱和方程中, 代入 $T_d = 90^\circ\text{F}$, $T_w = 70^\circ\text{F}$,

$$h_{ad} = 1061.7 + (0.43667)(90) = 1101.0 \text{ Btu/lb}_m$$

$$h_{fw} = 70 - 31.9 = 38.1 \text{ Btu/lb}_m$$

$$h_{fgw} = h_{gw} - h_{fw} = [1061.7 + (0.43667)(70)] - 38.1 = 1054.2 \text{ Btu/lb}_m$$

$$c_p = 0.24027 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

$$\omega_w = (0.622) P_v / (P - P_v) = (0.622) P_g / (P - P_g) = (0.622)(0.36304) / (14.70 - 0.36304) = 0.01575 \text{ [式中 } P_g \text{ 由双常数公式解得]. 可得}$$

$$\omega = \frac{(0.24027)(70 - 90) + (0.01575)(1054.2)}{1101.0 - 38.1} = 0.01110$$

因此 $P_v = \omega P / (\omega + 0.6220) = (0.01110)(14.70) / (0.01110 + 0.6220) = 0.2577 \text{ psia}$

$$P_a = P - P_v = 14.44 \text{ psia}$$

在 90°F , $\ln P_g = 17.01523 - (9549.5 / 549.69) = -0.35729$ 即 $P_g = 0.6996 \text{ psia}$

因此, $\phi = P_v / P_g = 0.2577 / 0.6996 = 36.8\%$. 最后

$$h_{\text{mix}} = h_a + \omega h_g = (0.24027)(90) + (0.01110)[1061.7 + (0.43667)(90)] = 33.84 \text{ Btu/lb}_m$$

9.34 湿空气的总压强为 1.01325 bar, 湿球温度为 20°C , 露点温度为 10°C , 利用图 F5, 求干球温度和湿空气的其他性质.

解 图 9-3 给出上述数据点的位置.

(a) 从交点垂直向下与干球温度标度轴大约交于 37.2°C .

(b) 将水平直线延伸至右边的轴, 得含湿量约为 $0.0077 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$.

(c) 相对湿度约为 $20 - (2/25)(10) \approx 19.2\%$.

(d) 从交点向左上方反向延长通过湿球温度标度轴, 求得焓约为 57.6 kJ/kg .

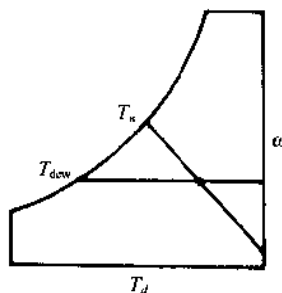


图 9-3

9.35 利用表 F3, 重解题 9.34.

解 在露点温度下, $P_v = P_g = 0.01228 \text{ bar}$, 故

$$\omega = (0.622) P_v / (P - P_v) = (0.622)(0.01228) / (1.0133 - 0.01228) = 7.630 \times 10^{-3}$$

在 20°C 的湿球温度条件下, 湿空气的焓为

$$h_a + \omega h_g = 20.121 + (0.01476)(2537.2) = 57.570 \text{ kJ/kg}$$

这也是在干球温度条件下的焓, 此时 $\omega = 7.630 \times 10^{-3}$, 故干球温度已由 $h_a + (7.630 \times 10^{-3}) h_g$ 隐含给出. 所以, 可通过试算法解出. 若 $T_d = 30^\circ\text{C}$, 则 $30.185 + (7.630 \times 10^{-3})(2553.5) = 49.67$ (太低); 若 $T_d = 35^\circ\text{C}$, 则 $35.219 + (7.630 \times 10^{-3})(2564.4) = 54.79$ (还是太低); 若 $T_d = 38^\circ\text{C}$, 则 $38.239 + (7.630 \times 10^{-3})(2569.8) = 57.85$ (略高); 对 $T_d = 37^\circ\text{C}$, 则 $h_a + \omega h_g = 56.83$. 因此 $T_d = 37 + [(57.57 - 56.83) / (57.85 - 56.83)](1) = 37.7^\circ\text{C}$. 这里假定 c_p 在 3°C 范围内为常数.

在 $37.7^{\circ}\text{C}=310.9\text{K}$, $\ln P_g = 14.43509 - (5333.3/310.9) = 2.71930$, 因此 $P_g = 0.06592\text{bar}$. 所以

$$\phi = P_v/P_g = 0.01228/0.06592 = 18.6\%$$

$$P_a = P - P_v = 1.01325 - 0.01228 = 1.00097\text{bar}$$

9.36 利用 Carrier 方程求 P_v , 并重解题 9.34.

解 已知 $T_w = 20^{\circ}\text{C}$, $P_{gw} = 0.02339\text{bar}$, $P = 1.01325\text{bar}$, Carrier 方程成为 $P_v = 0.0362 - (6.4227 \times 10^{-4})T_d$, 式中 T_d 的单位为 $^{\circ}\text{C}$. 但是在露点, $P_g = 0.01228\text{bar} = P_v$, 因此, 由 Carrier 方程求解得 $T_d = 37.24^{\circ}\text{C}$.

在 37.24°C , $P_g = 0.06280 + (0.24)(0.06330 - 0.06280) = 0.06364\text{bar}$

$$\phi = P_v/P_g = 0.01228/0.06364 = 19.3\%$$

进一步求得 $\omega = (0.622)P_v/(P - P_v) = (0.622)(0.01228)/(1.01325 - 0.01228) = 0.00763$

$$h_{\text{mix}} = h_a + \omega h_g = 37.303 + (0.00763)(2568.1) = 56.90\text{kJ/kg}$$

9.37 0.015kg 水蒸发到 1kg 绝干的空气中, 若得到的湿空气为 1bar, 35°C ($=T_d$), 试从图 F5 求: (a) 含湿量; (b) 相对湿度; (c) 露点温度; (d) 湿空气的比体积; (e) 湿空气的焓.

解 (a) 含湿量 = (水蒸气质量)/(干空气质量) = $0.015/1.000 = 0.015$.

(b) 在图 F5 上找到参数为 (T_d, ω) 的点, 则 $\phi \approx 40 + (5/22)(10) = 42.3\%$.

(c) 通过 $\omega = 0.015$, $T_d = 35^{\circ}\text{C}$ 作水平线与左边界交于 20.3°C .

(d) 比体积涉及图上 $v = 0.85$ 和 $v = 0.90\text{m}^3/\text{kg}$ 线之间的更不确定的插值. 假定线性,

$$v = 0.85 + (68.5/77.5)(0.05) = 0.894\text{m}^3/\text{kg}$$

(e) 从已知参数点沿等焓线向左上方延伸至焓轴, 求得焓值约为 74kJ/kg .

9.38^D 利用表 F1 的公式重解题 9.37.

解 (a) $\omega = m_v/m_a = 0.015/1 = 0.015$.

(b) $\phi = P_v/P_g$. 在 35°C , 由双常数方程

$$\ln P_g = 14.43509 - [5333.3/(273.15 + 35)] = -2.87239 \quad \text{即} \quad P_g = 0.05656\text{bar}$$

由三常数方程

$$\ln P_g = 12.19286 - [4109.1/(308.15 - 35.50)] = -2.87811$$

即 $P_g = 0.05624\text{bar}$. (表 F3 给出 0.05627)

水蒸气的分压为

$$P_v = \omega P / (\omega + 0.6220) = (0.015)(1.01325) / (0.015 + 0.6220) = 0.0239\text{bar}$$

因此 $\phi = 0.0239/0.05627 = 42.5\%$

(c) 在露点温度, 湿空气中水蒸气分压等于饱和蒸汽压.

(b) 中已给出水蒸气分压为 0.0239bar . 利用双常数方程,

$$\ln P_g = \ln 0.0239 = -3.73388 = 14.43509 - 5333.3/T(\text{K}) \quad \text{故} \quad T = 293.54\text{K} = 20.4^{\circ}\text{C}$$

(d) 湿空气分子质量

$$M_{\text{mix}} = \frac{\text{总质量}}{\text{总摩尔数}} = \frac{1.015}{(0.015/18.02) + (1/28.97)} = 28.714\text{kg/kmol}$$

因此理想气体定律给出:

$$v = \frac{R_g T_d}{M_{\text{mix}} P} = \frac{(8.315\text{kJ/kmol} \cdot \text{K})(308.15\text{K})}{(28.714\text{kg/kmol})(101.325\text{kPa})} = 0.881\text{m}^3/\text{kg}$$

(e) $h_{\text{mix}} = h_a + \omega h_g = (1.006)(35) + (0.015)[2501.7 + (1.82)(35)] = 73.69\text{kJ/kg}$

9.39 空气-水混合物的比焓是 50kJ/kg , 露点温度是 10°C , 若水以水蒸气的形式存在, 总压强为 1atm , 用图求: (a) 湿球温度; (b) 干球温度; (c) 含湿量; (d) 相对湿度.

解 在图 F5 中, 找到 50kJ/kg 的等焓线与通过露点 (10°C) 的水平线的交点, 则可求得

(b) $T_d = 29.8^{\circ}\text{C}$

(d) $\phi = 20 + (14/16)(10) = 28.8\%$

(c) $\omega = 0.0077\text{kgH}_2\text{O/kg da}$

(a) $T_w \approx 17.7^{\circ}\text{C}$

9.40 利用表 F1 重解题 9.39.

解 (c) 在露点温度 (283.15K), $\ln P_g = 12.19286 - [4109.1/(283.15 - 35.50)] = -4.39951$,

即 $P_g = 0.01228 \text{ bar} = P_v$, 因此, $\omega = (0.622)P_v / (P - P_v) = (0.622)(0.01228) / (1.01325 - 0.01228) = 7.631 \times 10^{-3}$.

(b) 已知 $h_{\max} = 50 \text{ kJ/kg} = h_a + \omega h_g = h_a + (7.631 \times 10^{-3})h_g$, 用试算法求得 (参见题 9.35) $T_d \approx 30.3^\circ\text{C}$.

(d) 在 30.3°C , $\ln P_g = 12.19286 - 4109.1/267.95 = -3.14246$, 因此 $P_g = 0.04318 \text{ bar}$, $\phi = P_v/P_g = 0.01228/0.04318 = 28.4\%$.

(a) 求湿球温度最简单方法是用试算法解方程

$$h_{\max} = 50 \text{ kJ/kg} = h_a + \omega_g h_g - (1.006)T_w + [(0.622)P_g / (P - P_g)][2501 + (1.83)T_w]$$

由此解得 $T_w \approx 17.7^\circ\text{C}$.

9.41^D 处在大气压下的湿空气, $T_d = 85^\circ\text{F}$, 其质量分析为 1% H_2O , 99% 空气, 利用表 F4, 求:

(a) 含湿量 ($\text{lb}_m \text{H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{da}$); (b) 相对湿度 (%); (c) 露点温度 ($^\circ\text{F}$); (d) 混合物的焓 (Btu / lb_m); (e) 混合物的比体积 ($\text{ft}^3 / \text{lb}_m$).

解 (a) $\omega = m_v / m_a = 0.01 / 0.99 = 0.0101 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{da}$

(b) 在图 F4 上找到所给条件 (T_d, ω) 的点, 在该点, 相对湿度约为

$$30 + (21.3/24)(10) = 38.9\%$$

(c) 从条件点水平向左移至饱和边界, 求得

$$T_{\text{dew}} \approx 57.3 \sim 57.4^\circ\text{F}$$

(d) 沿等焓线向左上方移动至焓轴, 得 $h_{\max} \approx 31.6 \text{ Btu} / \text{lb}_m$.

(e) 在比体积线之间插值, 得

$$v = 13.5 + (59.0/65.6)(0.5) = 13.95 \text{ ft}^3 / \text{lb}_m$$

9.42 利用表 F2 数据, 重解题 9.41.

解 (a) $\omega = m_v / m_a = 0.01 / 0.99 = 0.0101 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{da}$

(b) $P_v = \omega P / (\omega + 0.622) = (0.0101)(14.696) / (0.0101 + 0.6220) = 0.2348 \text{ psia}$, 则

$$\phi = P_v / P_g = 0.2348 / 0.5965 = 39.4\%$$

(c) 在露点温度, 水的饱和蒸汽压是 0.2348 psia, 假定为线性插值, 可得

$$57 + [(0.2348 - 0.2302) / (0.2387 - 0.2302)](1) = 57 + (0.0046 / 0.0085) = 57.5^\circ\text{F}$$

(d) 在 85°F , $h_{\max} = h_a + \omega h_g = 20.424 + (0.0101)(1098.2) = 31.52 \text{ Btu} / \text{lb}_m$

(e) 由于表中无比体积数据, 只能从理想气体方程求比体积 (参见题 9.43).

9.43 利用表 F1 的公式, 重解题 9.41.

解 (a) $\omega = m_v / m_a = 0.01 / 0.99 = 0.0101$

(b) 和题 9.42(b) 一样, $P_v = 0.2348 \text{ psia}$, 对蒸汽压运用三常数方程, 得

$$\ln P_g = 14.97156 - [7490.8 / (459.69 + 85 - 61.05)] = -0.51682, \text{ 即 } P_g = 0.5964 \text{ psia. 因此,}$$

$$\phi = P_v / P_g = 0.2348 / 0.5964 = 39.4\%$$

(c) 在露点温度, $P_g = P_v = 0.2348 \text{ psia}$, 即

$$\ln P_g = -1.44860 = 14.97156 - [7490.8 / (T_{\text{dew}} - 61.05)]$$

求得 $T_{\text{dew}} = 517.23^\circ\text{R} = 57.5^\circ\text{F}$.

(d) $h_{\max} = h_a + \omega h_g = (0.24027)T_d + \omega(1061.7 + 0.43667T_d)$

$$= (0.24027)(85) + (0.0101)[1061.7 + (0.43667)(85)] = 31.51 \text{ Btu} / \text{lb}_m$$

(e) 以 1 lb_m 为基础, 计算湿空气的分子质量

$$M_{\max} = \frac{\text{总质量}}{\text{总摩尔数}} = \frac{1}{(0.01/18.02) + (0.99/28.97)} = 28.795 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole}$$

则由理想气体定律得

$$v = \frac{R_g T_d}{M_{\max} P} = \frac{(1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{lb}_m \text{ mole} \cdot ^\circ\text{R})(544.69^\circ\text{R})}{(28.795 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole})(14.696)(144 \text{ lb}_f / \text{ft}^2)} = 13.81 \text{ ft}^3 / \text{lb}_m$$

简单加热或冷却

9.44^D 1 bar, 42°C , 相对湿度为 10% 的空气流过一管道后被冷却至 12°C . 试在空气湿度图上描绘这一过程, 标出起点 1 和终点 2, 该过程传递了多少热量 (kJ / kg)?

解 加热湿空气不会影响含湿量,冷却也不会影响。(除非到达露点,凝结出现。)起始点 1(图 9-4)被确定后,沿定含湿线水平向左移动,直至 12°C 干球温度的正上方。在此过程中,没有和饱和边界相交,所以没有出现凝结。由稳定流动能量方程可知,在没有任何功相互作用和能量效应时,传递的热量就是焓差 $h_2 - h_1$,从图 F5 锯齿状的焓轴上可读到 $h_2 \approx 24.6 \text{ kJ/kg}$, $h_1 \approx 54.2 \text{ kJ/kg}$; 因此, $q = h_2 - h_1 = -29.6 \text{ kJ/kg}$ 。负号表示湿空气被冷却。

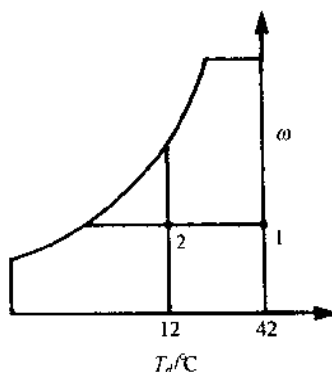


图 9-4

9.45^D 利用表 F3,重解题 9.44.

解 先写出 $q = h_2 - h_1 = (h_{a2} + \omega_2 h_{g2}) - (h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) =$

$(h_{a2} - h_{a1}) + \omega_1 (h_{g2} - h_{g1})$, 式中 h 表达式假定无凝结出现。

(可以像题 9.44 中那样,应用空气湿度图验证确实无凝结出现。)

除了 ω_1 , q 表达式中的所有量表中都有,而 ω_1 则可计算得到。在 42°C, $P_{g1} = 0.08205 \text{ bar}$, $\phi_1 = 0.10$, 故 $P_{v1} = \phi_1 P_{g1} = 0.00821 \text{ bar}$, 而

$$\omega_1 = (0.622)P_{v1}/(P - P_{v1}) = (0.622)(0.00821)/(1.01325 - 0.00821) = 0.00508$$

从表中查到,在 42°C,

$$h_{a1} = 42.268 \text{ kJ/kg}, h_{g1} = 2576.9 \text{ kJ/kg}, h_{a2} = 12.071 \text{ kJ/kg}, h_{g2} = 2522.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{因此, } q = (12.071 - 42.268) + (0.00508)(2522.6 - 2576.9) = -30.473 \text{ kJ/kg}$$

负号表示热量从系统传出。

9.46 利用表 F1,重解题 9.44.

解 和题 9.45 一样,对无凝结的冷却过程,有 $q = (h_{a2} - h_{a1}) + \omega_1 (h_{g2} - h_{g1})$ 。已知 $h_{a2} - h_{a1} = c_p (T_2 - T_1)$, $h_{g2} - h_{g1} = (2501 + 1.83T_2) - (2501 + 1.83T_1) = 1.83(T_2 - T_1)$, 和 $c_p(\text{空气}) = 1.006 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。已求得 ω_1 是 0.00508(如问题 9.45)。因此,

$$q = [1.006 + (1.83)(0.00508)](12 - 42) = -30.46 \text{ kJ/kg}$$

(有热量输出)

9.47^D 14.696 psia, 100°F, 相对湿度为 10% 的湿空气通过一管道后被冷却至 50°F。试用空气湿度图描绘这一过程,标出起点 1 和终点 2。该过程传递了多少热量(Btu/lb_m)?

解 加热湿空气不会影响含湿量,冷却也不影响。(除非到达露点,凝结出现。)起始点 1(图 9-4)被确定后,沿定含湿线水平向左移动,直至 50°F 干球温度的正上方。因在此过程中,未与饱和边界相交,所以没有凝结出现。

由稳定流动能量方程可知,在没有任何功相互作用和能量效应时,传递的热量就是焓差 $h_2 - h_1$,从图 F4 锯齿状的焓轴上可读到 $h_2 \approx 16.6 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$ 和 $h_1 \approx 28.7 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$ 。因此, $q = h_2 - h_1 = -12.12 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$ 。负号表示湿空气被冷却。

9.48^D 利用表 F1,重解题 9.47.

解 对无凝结的冷却过程[需要检验],列式 $q = h_2 - h_1 = (h_{a2} + \omega_2 h_{g2}) - (h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) = (h_{a2} - h_{a1}) + \omega_1 (h_{g2} - h_{g1})$ 。下面计算 ω_1 , 在 100°F, 有 $P_{g1} = 0.95034 \text{ psia}$, 故 $P_{v1} = \phi_1 P_{g1} = (0.10)(0.95034) = 0.09503 \text{ psia}$, 则 $\omega_1 = (0.622)P_{v1}/(P - P_{v1}) = (0.622)(0.09503)/(14.696 - 0.09503) = 0.00405$ 。现利用表 F1 中的公式求得 h_a 和 h_g , 则求得

$$q = (0.24027)(50 - 100) + (0.00405)(0.43667)(50 - 100) = -12.102 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$$

负号表示热量从系统传出。

加热和加湿

9.49^D 相对湿度为 30%, 8°C 的冷空气被加热到 31°C, 然后经过一蒸发冷却器温度降至 21.1°C。利用图 F5, 求(a)输入热量(kJ/kg da); (b)加水量(kg H₂O/kg da); (c)最终相对湿度(%)。

解 参见图 9-5。加热过程 1→2 含湿量固定; 冷却过程 2→3(喷入水)比焓固定。

(a) 图 F5 给出 $h_1 \approx 12.5 \text{ kJ/kg}$ (需要将标度尺外推得到), $h_2 = 36.8 \text{ kJ/kg}$, 然后, 由能量方程

$$q = h_2 - h_1 = 36.8 - 12.5 = 24.3 \text{ kJ/kg da}$$

(b) $2 \rightarrow 3$ 过程所加的水为 $\omega_3 - \omega_2 = 0.0061 - 0.0020 = 0.0041 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$.

(c) 最终相对湿度约为 39%.

9.50^D 利用表 F3, 重解题 9.49.

解 (a) 在状态 1, $P_{s1} = 0.010730 \text{ bar}$, 则 $P_{v1} = \phi P_{s1} = (0.30)$

$(0.01073) = 0.00322 \text{ bar}$, 故 $\omega_1 = (0.6220) P_{v1} / (P - P_{v1}) = (0.6220)$

$(0.00322) / (1.01325 - 0.00322) = 0.00198 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$, 因此, $h_1 =$

$h_{a1} + \omega_1 h_{s1} = 8.047 + (0.00198)(2515.2) = 13.03 \text{ kJ/kg da}$. 由稳定流动能量方程 $q = h_2 - h_1 = 36.26 - 13.03 = 23.23 \text{ kJ/kg da}$.

(b) 在状态 3 的含湿量可由下式确定, 即 $h_2 = 36.26 \text{ kJ/kg da} = h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{s3} = 21.228 + \omega_3 (2539.2)$, 式中 h_a 和 h_s 由 21.1°C 处经插值得. 解得 $\omega_3 = 5.919 \times 10^{-3} \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$. 所以, 所加的水为 $\omega_3 - \omega_2 = 3.939 \times 10^{-3} \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$.

(c) 在状态 3, $P_{s3} = \omega_3 P / (0.622 + \omega_3) = (0.0059)(1.01325) / (0.622 + 0.0059) = 9.552 \times 10^{-3} \text{ bar}$ 和 $P_{g3} = 0.025034 \text{ bar}$. 因此,

$$\phi_3 = P_{s3} / P_{g3} = 0.00955 / 0.02503 = 38.2\%$$

9.51^D 利用表 F1 的公式, 重解题 9.49.

解 (a) 与题 9.50(a) 的解题过程一样. 在 8°C 时, 三常数方程给出:

$$\ln P_{s1} = 12.19286 - [4109.1 / (281.15 - 35.50)] = -4.53460, \text{ 即 } P_{s1} = 0.010731 \text{ bar},$$

则

$$P_{v1} = \phi P_{s1} = (0.30)(0.010731) = 0.003219 \text{ bar}$$

$$\omega_1 = (0.6220) P_{v1} / (P - P_{v1}) = (0.6220)(0.003219) / (1.01325 - 0.00322)$$

$$= 0.001982 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}.$$

$$h_1 = h_{a1} + \omega_1 h_{s1} = (1.006)(8) + (0.001982)[2501 + (1.83)(8)] = 13.035 \text{ kJ/kg}$$

同样, 在 31°C , $h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{s2}$

$$= h_{a2} + \omega_1 h_{s2} = (1.006)(31) + (0.001982)[2501 + (1.83)(31)] = 36.256 \text{ kJ/kg}$$

所以, 稳定流动传输的热量为 $q = h_2 - h_1 = 36.256 - 13.035 = 23.221 \text{ kJ/kg}$.

(b) 与题 9.50(b) 的求解过程一样,

$$h_2 = 36.256 \text{ kJ/kg} = h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{s3} = (1.006)(21.1) + \omega_3 [2501 + (1.83)(21.1)]$$

解得 $\omega_3 = 5.917 \times 10^{-3} \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$. 则所加水为

$$\omega_3 - \omega_2 = 3.935 \times 10^{-3} \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$$

(c) 最终相对湿度为 $\phi_3 = P_{s3} / P_{g3}$. 由三常数蒸汽压方程,

$$\ln P_{s3} = 12.19286 - [4109.1 / (294.25 - 35.50)] = -3.68772, \text{ 即 } P_{s3} = 0.02503 \text{ bar};$$

$$P_{v3} = \omega_3 P / (0.6220 + \omega_3) = (5.917 \times 10^{-3})(1.01325) / (0.6220 + 0.0060)$$

$$= 9.548 \times 10^{-3} \text{ bar}$$

因此,

$$\phi_3 = 0.009548 / 0.02503 = 38.2\%$$

9.52^D 相对湿度为 30%, 45°F 的冷空气被加热到 85°F , 然后经过一蒸发冷却器温度降至 70°F , 利用图 F4, 求: (a) 输入热量 ($\text{Btu/lb}_m \text{ da}$); (b) 加水量 ($\text{lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$); (c) 最终相对湿度 (%).

解 图 9-5 构划出了该过程. 状态 2 在 85°F 正上方, 状态 3 在 70°F 正上方, 过程 $2 \rightarrow 3$ 是等焓的.

(a) 图上 40°F 附近只给出相对湿度为 20% 和 40% 的两条线, 测量这两条线到基线 (相对湿度为 0%) 的距离, 可知两线间含湿量的增长非常均匀, 将两线间的中点取作相对湿度为 30% 的点. 在该点,

$$\omega_1 \approx 0.0018 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$$

另一方面, $h_1 \approx 12.8 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$. 在 $\omega_2 = \omega_1$ 和 $T_2 = 85^\circ\text{F}$, 向左上方移动, 求得

$$h_2 \approx 22.7 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$$

对于没有作功的稳定流动过程,

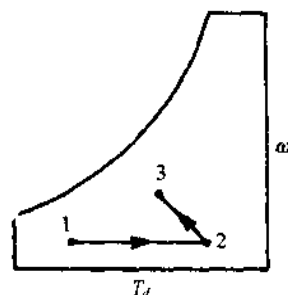


图 9-5

$${}_1q_2 - h_2 - h_1 = 22.7 - 12.8 = 9.85 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$$

(b) 平行于等焓线朝左上方移动, 在 70°F 下球温度点,

$$\omega_3 \approx 5.28 \times 10^{-3} \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$$

因此所加水量为 $\omega_3 - \omega_2 = (5.28 - 1.89) \times 10^{-3} = 3.39 \times 10^{-3} \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$

$$(c) \quad \phi_2 \approx 30 + (4.7/13)(10) = 33.6\%$$

9.53^D 利用表 F2, 重解题 9.52.

解 该过程被示于图 9-5 中。由于加热湿空气不改变含湿量, 故 $\omega_1 = \omega_2$, 而 2→3 的喷雾过程是等焓的。(a) 在初始条件下, $P_{v1} = \phi P_{s1} = (0.30)(0.14755) = 0.04427 \text{ psia}$, 因此,
 $\omega_1 = (0.6220)P_{v1}/(P - P_{v1}) = (0.6220)(0.04427)/(14.70 - 0.0443) = 1.879 \times 10^{-3} \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$
 由此求得

$$h_1 = h_{a1} + \omega_1 h_{g1} = 10.810 + (1.879 \times 10^{-3})(1080.8) = 12.841 \text{ Btu/lb}_m$$

在加热到 85°F 过程中, ω 没有变化, 故

$$h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{g2} = h_{a2} + \omega_1 h_{g2} = 20.424 + (1.879 \times 10^{-3})(1098.2) = 22.488 \text{ Btu/lb}_m$$

由于 1→2 没有功的作用,

$${}_1q_2 = h_2 - h_1 = 22.488 - 12.841 = 9.647 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$$

(b) 在状态 3 的含湿量取决于

$$h_2 = 22.488 \text{ Btu/lb}_m = h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{g3} = 16.818 + \omega_3(1091.8)$$

因此, $\omega_3 = 5.193 \times 10^{-3} \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$, 喷入的水为

$$\omega_3 - \omega_2 = 0.005193 - 0.001879 = 0.003314 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$$

(c) 在状态 3, $P_{s3} = \omega_3 P / (0.6220 + \omega_3) = (5.193 \times 10^{-3})(14.70) / (0.6220 + 0.0052) = 0.1217 \text{ psia}$ 和 $P_{g3} = 0.3633 \text{ psia}$, 所以,

$$\phi_3 = P_{s3} / P_{g3} = 0.1217 / 0.3633 = 33.5\%$$

9.54^D 利用表 F1 的公式, 重解题 9.52.

解 (a) 仿照题 9.53(a) 的解题步骤。在 45°F, 三常数水蒸气方程给出

$$\lg P_g = 14.97156 - [7490.8 / (504.69 - 61.05)] = -1.91330 \quad \text{即} \quad P_g = 0.14759 \text{ psia}$$

则

$$P_{v1} = \phi_1 P_{g1} = (0.30)(0.14759) = 0.04428 \text{ psia}$$

$\omega_1 = (0.6220)P_{v1} / (P - P_{v1}) = (0.6220)(0.04428) / (14.70 - 0.0443) = 1.879 \times 10^{-3} \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$
 故湿空气的焓为

$$h_1 = h_{a1} + \omega_1 h_{g1} = (0.24027)(45) + (0.001879)[1061.7 + (0.43667)(45)] = 12.844 \text{ Btu/lb}_m$$

同样, 在 85°F,

$$h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{g2} = h_{a2} + \omega_1 h_{g2} = (0.24027)(85) + (0.001879)[1061.7 + (0.43667)(85)] = 22.488 \text{ Btu/lb}_m$$

因没有做功, 稳定流动能量方程给出 ${}_1q_2 = 22.488 - 12.844$.

(b) 仿照题 9.53(b) 的步骤:

$$h_2 - 22.488 = h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{g3} = (0.24027)(70) + \omega_3[1061.7 + (0.43667)(70)]$$

解得

$$\omega_3 = 5.190 \times 10^{-3} \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$$

喷入的水为 $\omega_3 - \omega_2 = 0.005190 - 0.001879 = 0.003311 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$.

(c) 在终点 3, 饱和蒸汽压是

$$\ln P_{g3} = 14.97156 - [7490.8 / (529.69 - 61.05)] = -1.01256 \quad \text{即} \quad P_{g3} = 0.36329 \text{ psia}$$

$$P_{s3} = \omega_3 P / (0.6220 + \omega_3) = (0.00519)(14.70) / (0.6220 + 0.0052) = 0.1216 \text{ psia}$$

故

$$\phi_3 = P_{s3} / P_{g3} = 0.1216 / 0.3633 = 33.5\%$$

9.55^D 相对湿度为 30%, 8°C 的冷空气被加热, 然后喷入 10°C 的水直至空气被冷却至 21.1°C, 相对湿度为 38.3%。利用图 F5, 求: (a) 空气被加热到多少度(°C); (b) 所需的热量(kJ/kg da); (c) 喷入的水量(kg H₂O/kg da)。

解 参见题 9.49。本题是它的一个变形。先找到点 1 (图 9-5 中), 通过该点向右作一水平线, 再确定点 3, 通过该点作等焓线的平行线与水平线相交, 则可读到

$$T_{d2} \approx 31.0^\circ\text{C}, \omega_2 \approx 0.002 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}, h_2 \approx 36.8 \text{ kJ/kg da}$$

$$h_1 \approx 12.5 \text{ kJ/kg da}, \omega_1 \approx 0.006 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$$

由这些数据,可得

- (a) $T_{d_2} = 31.0^\circ\text{C}$
 (b) $q = h_2 - h_1 = 24.3 \text{ kJ/kg da}$
 (c) $\Delta\omega = 0.0040 \text{ kgH}_2\text{O/kg da}$

9.56^D 利用表 F3, 重解题 9.55.

解 由表知, 在 8°C , $P_{s1} = 0.01073 \text{ bar}$, 故

$$P_{v1} = \phi_1 P_{s1} = (0.30)(0.01073) = 0.00322 \text{ bar}$$

$$\omega_1 = (0.622)P_{v1}/(P - P_{v1}) = (0.622)(0.00322)/(1.01325 - 0.00322) = 0.00198 = \omega_2$$

另一方面, 对 21.1°C 插值, $P_{s2} = 0.024877 + (0.1)(0.00157) = 0.02503 \text{ bar}$

因此, $P_{v3} = \phi_3 P_{s3} = (0.383)(0.02503) = 0.00959 \text{ bar}$

$$\omega_3 = (0.622)P_{v3}/(P - P_{v3}) = (0.622)(0.00959)/(1.01325 - 0.00959) = 0.00594$$

同样, $h_{a3} = 21.127 + (0.1)(1.006) = 21.228 \text{ kJ/kg}$ 和 $h_{s3} = 2539.0 + (0.1)(1.8) = 2539.2 \text{ kJ/kg}$,

求得 $h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{s3} = 21.228 + (0.00594)(2539.2) = 36.316 \text{ kJ/kg}$.

(a) 用试算法解方程 $36.316 = h_3 = h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{s2} = h_{a2} + \omega_1 h_{s2} = h_{a2} + (0.00198)h_{s2}$ 可求空气加热后的温度 (T_2):

试 30°C , $h_{a2} = 30.185$, $h_{s2} = 2553.5$, 得 $h_{a2} + (0.00198)h_{s2} = 35.241$ (太低)

试 35°C , $h_{a2} = 35.219$, $h_{s2} = 2564.4$, 得 $h_{a2} + (0.00198)h_{s2} = 40.297$ (太高)

假定为线性插值,

$$T_2 = 30 + [(36.316 - 35.241)/(40.297 - 35.241)](5) = 31.06^\circ\text{C}$$

[利用表中 31°C 的数据校验, $h_{a2} + \omega_2 h_{s2} = 36.26$ (略低)]

(b) 假定最高温度为 31.1°C , $h_2 = 36.316 \text{ kJ/kg da}$; 初始值

$$h_1 = h_{a1} + \omega_1 h_{s1} = 8.097 + (0.00198)(2515.2) = 13.027 \text{ kJ/kg da}$$

因此,

$$q = h_2 - h_1 = 23.29 \text{ kJ/kg da}$$

(c) 喷入的水量为 $\omega_3 - \omega_2 = \omega_1 - \omega_1 = 0.00594 - 0.00198 = 0.00396 \text{ kgH}_2\text{O/kg da}$

9.57^D 利用表 F1 中的公式, 重解题 9.55.

解 (a) 在 8°C , 三常数蒸汽压方程给出

$$\ln P_{s1} = 12.19286 - [4109.1/(281.15 - 35.50)] = -4.53460 \quad \text{即} \quad P_{s1} = 0.01073 \text{ bar}$$

因此, 和题 9.56 一样, $\omega_1 = \omega_2 = 0.00198$. 同样在状态 3, 又得到了题 9.56 的结果, $\omega_3 = 0.00594$. 所以,

$$h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{s3} = [(1.006)(21.1)] + (0.00594)[2501 + (1.83)(21.1)] = 36.312 \text{ kJ/kg da}$$

而 $h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{s2} = h_{a2} + \omega_1 h_{s2} = [(1.006)T_2] + (0.00198)[2501 + (1.83)T_2]$

令 $h_3 = h_2$, 由此解得 $T_2 = 31.05^\circ\text{C}$.

(b) 由稳定流动能量方程可知, 所需热量就是焓的变化. 已知 $h_2 = h_3 = 36.315 \text{ kJ/kg da}$, 又可计算得

$$h_1 = h_{a1} + \omega_1 h_{s1} = [(1.006)(8)] + (0.00198)[2501 + (1.83)(8)] = 13.029 \text{ kJ/kg da}$$

因此 $q = h_2 - h_1 = 36.312 - 13.029 = 23.28 \text{ kJ/kg da}$

(c) 喷入的水量为 $\omega_3 - \omega_2 = 0.00594 - 0.00198 = 0.00396 \text{ kgH}_2\text{O/kg da}$

9.58^D 相对湿度为 30%, 45°F 的冷空气被加热. 加热后, 喷入 50°F 的水直至空气被冷却至 72°F 而相对湿度为 40%. 利用表 F4, 求: (a) 加热后空气的温度 ($^\circ\text{F}$); (b) 所需的热量 ($\text{Btu/lb}_m \text{ da}$); (c) 喷入的水量 ($\text{lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$).

解 参见题 9.52, 本题是它的变形. 确定初始点 1 需要通过插值找相对湿度为 30% 的点. 由于相对湿度 0% (基线), 20% 和 40% 的线基本上是等间距的, 干球温度为 45°F , 相对湿度为 30% 的点就可确定. 然后通过该点向右作水平线, 接着可确定终点 3, 并过该点向右下方作等焓线的平行线与水平线相交, 可读出

$$\begin{aligned} T_2 &\approx 93.2^\circ\text{F}, & h_1 &\approx 12.9 \text{ Btu/lb}_m \text{ da} \\ \omega_2 &\approx 0.002 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}, & h_2 &\approx 24.8 \text{ Btu/lb}_m \text{ da} \\ \omega_3 &\approx 0.0067 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da} \end{aligned}$$

所以: (a)

$$T_2 \approx 93.2^\circ\text{F}$$

$$(b) \quad q_2 = h_2 - h_1 = 24.8 - 12.9 = 11.9 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$$

$$(c) \quad \Delta m = \omega_3 - \omega_2 = 0.0067 - 0.002 = 0.0047 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{ da}$$

9.59^D 利用表 F2, 重解题 9.58.

解 在 45°F, 表中给出 $P_{g1} = 0.14755 \text{ psia}$, 因此,

$$P_{v1} = \phi_1 P_{g1} = (0.30)(0.14755) = 0.04427 \text{ psia}$$

$$\omega_1 = (0.622)P_{v1} / (P - P_{v1}) = (0.622)(0.04427) / (14.70 - 0.04427) = 0.00188 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{ da} \quad \omega_2$$

$$\text{在终点 3,} \quad P_{g3} = 0.38883 \text{ psia} \quad P_{v3} = \phi_3 P_{g3} = (0.40)(0.38883) = 0.15553 \text{ psia}$$

$$\omega_3 = (0.622)P_{v3} / (P - P_{v3}) = (0.622)(0.15553) / (14.70 - 0.15553) = 0.00655 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{ da}$$

$$h_1 = h_{a1} + \omega_1 h_{g1} = 17.299 + (0.00188)(1092.2) = 24.562 \text{ Btu/lb}_m$$

(a) 由试算法解方程, $24.562 = h_3 = h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{g2} = h_{a2} + (0.00188)h_{g2}$, 可确定温度 T_2 .

试 $T_2 = 90^\circ\text{F}$, $h_{a2} = 21.626$, $h_{g2} = 1100.4$, 得

$$h_2 = 21.626 + (0.00188)(1100.4) = 23.695 \text{ (太低)}$$

试 $T_2 = 95^\circ\text{F}$, $h_{a2} = 22.828$, $h_{g2} = 1102.6$, 得

$$h_2 = 22.828 + (0.00188)(1102.6) = 24.901 \text{ (太高)}$$

假定线性插值有效, 则

$$T_2 = 90 + (24.562 - 23.695) / (24.901 - 23.695)(5) = 93.6^\circ\text{F}$$

(b) 在状态 1, $h_1 = h_{a1} + \omega_1 h_{g1} = 10.812 + (0.00188)(1081.4) = 12.845 \text{ Btu/lb}_m$, 因此,

$$q = h_2 - h_1 = 24.562 - 12.845 = 11.717 \text{ Btu/lb}_m$$

(c) 喷入的水为

$$\omega_3 - \omega_2 = 0.00655 - 0.00188 = 0.00467 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{ da}$$

9.60^D 利用表 F1 公式, 重解题 9.58.

解 (a) 在 $T_1 = 45^\circ\text{F} = 504.69^\circ\text{R}$,

$$\ln P_{g1} = 14.97156 - [7490.8 / (504.69 - 61.05)] = -1.91330$$

即

$$P_{g1} = 0.14759 \text{ psia}, \quad P_{v1} = \phi_1 P_{g1} = (0.30)(0.14759) = 0.04428 \text{ psia}$$

则

$$\omega_1 = (0.622)P_{v1} / (P - P_{v1}) = (0.622)(0.04428) / (14.70 - 0.04428) \\ = 0.001879 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{ da} = \omega_2$$

同样, 在 $T_3 = 72^\circ\text{F} = 531.69^\circ\text{R}$,

$$\ln P_{g3} = 14.97156 - [7490.8 / (531.69 - 61.05)] = -0.94464 \quad \text{即} \quad P_{g3} = 0.38882 \text{ psia}$$

则

$$P_{v3} = \phi_3 P_{g3} = (0.40)(0.38882) = 0.15553 \text{ psia}$$

$$\omega_3 = (0.622)P_{v3} / (P - P_{v3}) = (0.622)(0.15553) / (14.7 - 0.15553) = 0.00665 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{ da}$$

$$h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{g3} = [(0.24027)(72)] + (0.00665)[1061.7 + (0.43667)(72)] = 24.57 \text{ Btu/lb}_m$$

令 $h_3 = h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{g2} = h_{a2} + \omega_1 h_{g1} = [(0.24027)T_2] + (0.001879)[1061.7 + (0.43667)T_2]$,

可得 $T_2 = 93.63^\circ\text{F}$. [校核: $(0.24027)(93.63) + (0.001879)[1061.7 + (0.43667)(93.63)] = 24.568 \text{ Btu/lb}_m$.]

(b) 所需热量为

$$q_2 = (h_{a2} - h_{a1}) + \omega_1 (h_{g2} - h_{g1}) = (0.24027)(93.63 - 45) + (0.001879)(0.43667)(93.63 - 45) \\ = 11.72 \text{ Btu/lb}_m$$

(c)

$$\Delta m = \omega_3 - \omega_2 = 0.00665 - 0.00188 = 0.00477 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{ da}$$

蒸发冷却

9.61^D 20°C 的绝干空气放在绝热容器中, 喷入水使之刚好饱和. 利用图 F5, 求: (a) 最终温度 (°C); (b) 喷入的水量 (kg H₂O / kg da).

解 如图 9-6 所示, 该过程沿倾斜的等焓线 $h = h_{a1} = 20.0 \text{ kJ/kg}$ 从一个端点 (干燥, 1) 到另一个端点 (饱和, 2).

(a) 等焓线与饱和边界交于 $T_2 = 5.8^\circ\text{C}$.

(b) 在饱和边界上 5.8°C 处, $\omega_2 \approx 0.005 + (4.5/7)(0.001) = 0.0057 \text{ kg H}_2\text{O} / \text{kg da}$, 因 $\omega_1 = 0$, 这即为喷入的水量.

9.62^D 利用表 F3, 重解题 9.61.

解 (a) 参照图 9-6, 因 $\omega_1 = 0, h_1 = h_{s1} = 20.121 \text{ kJ/kg}$, 所以,
 $20.121 = h_2 = h_{s2} + \omega_2 h_{f2}$, 采用试算法, 可从这一隐含的公式中求得 T_2 .

在 5°C , $h_{s2} + \omega_2 h_{f2} = 5.029 + (0.00542)(2509.7) = 18.632$ (太低)

在 6°C , $h_{s2} + \omega_2 h_{f2} = 6.036 + (0.00586)(2511.5) = 20.653$ (太高)

假定为线性插值, $T_2 = 5 + [(20.121 - 18.632)/(20.653 - 18.632)](1) = 5.7^\circ\text{C}$.

(b) 由于终态刚好饱和, 在表 F3 中插值得到

$$\begin{aligned}\omega_2 &= \omega_g = 0.00542 + (0.7)(0.00040) = 0.00570 \text{ kgH}_2\text{O/kg da} \\ &= (\text{含水量})\end{aligned}$$

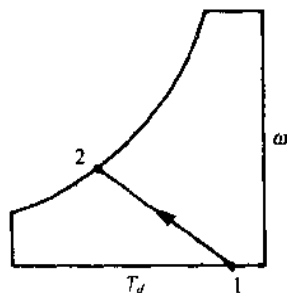


图 9-6

9.63^D 利用表 F1 中的适当公式, 重解题 9.61.

解 (a) 按图 9-6 中的记号, $h_1 = h_{s1} = (1.006)(20) = 20.120 \text{ kJ/kg}$, 因而,

$$20.120 = h_2 = h_{s2} + \omega_2 h_{f2} = (1.006)T_2 + [(0.6220 P_{s2})/(P - P_{s2})](2501 + 1.83T_2) \quad (1)$$

因假定 $P = 1.01325 \text{ bar}$ 和 P_{s2} 可用与 T_2 有关的双常数或三常数经验公式表示, 式(1)可方便地用牛顿法解(题 7.111). 这里则用试算法解. 假定 $T_2 = 5^\circ\text{C}$, 则

$$20.120 = (1.006)(5) + \omega_2 [2501 + (1.83)(5)]$$

故 $\omega_2 = 6.012 \times 10^{-3}$, 而

$$P_{s2} = \omega_2 P / (0.6220 + \omega_2) = (6.012 \times 10^{-3})(1.01325) / (0.6220 + 0.0060) = 9.699 \times 10^{-3} \text{ bar}$$

利用双常数蒸汽压公式, $\ln(9.699 \times 10^{-3}) = -4.63573 = 14.43509 - 5333.3/T_2$

即 $T_2 = 279.66 \text{ K} = 6.51^\circ\text{C}$ (不好). 继续以这种方式计算, 令 $T_2 = 6^\circ\text{C}$, 5.7°C 等, 最终确定 $T_2 \approx 5.75^\circ\text{C}$.

(b) 对应于 $T_2 = 5.75^\circ\text{C}$, $\omega_2 = 0.00571$. 初始状态为绝干, 即 $\omega_1 = 0$, 因此喷入的水为

$$\omega_2 - \omega_1 = 0.00571 \text{ kgH}_2\text{O/kg da}$$

9.64^D 利用表 F1 中的绝热饱和方程, 重解题 9.61.

解 (a) 按图 9-6 中的记号, 绝热饱和方程为 $\omega_1 (h_{s1} - h_{f2}) = c_p (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{f2}$,

式中, $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $\omega_1 = 0$, $c_p = 1.006 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 和 $h_{s1} = 2537.2 \text{ kJ/kg}$, 得到以下有关 T_2 的关系式:

$$(1.006)(20 - T_2) = \omega_2 h_{f2} \quad (1)$$

公式(1)的试算结果示于表 9-1.

表 9-1

$T_2/^\circ\text{C}$	左边结果	ω_2	h_{f2}	右边结果	左右关系
5	15.09	0.00542	2488.7	13.49	右 < 左
10	10.06	0.00766	2175.9	18.97	右 > 左
15	5.03	0.01069	2465.1	26.35	右 >> 左
.....
6	14.08	0.00582	2485.3	14.47	右 > 左

显然, $5 < T_2 < 6^\circ\text{C}$, 可应用插值将该过程继续下去, 直至求得结果.

(b) 从表 9-1, 喷入的水量 ω_2 , 介于 0.00542 和 0.00582 之间, 最终结果依赖于 T_2 .

9.65^D 利用 Carrier 方程, 重解题 9.61.

解 (a) 按图 9-6 的记号, Carrier 方程可写成

$$\frac{(20^\circ\text{C}) - T_2}{(1555.6^\circ\text{C}) - (0.7222)T_2} = \frac{P_{s2}}{(1.01325 \text{ bar}) - P_{s2}}$$

式中 P_{s2} 可以作为 T_2 的函数由双常数蒸汽压公式估计得到. 试算结果示于表 9-2.

表 9-2

$T_2/^\circ\text{C}$	左边结果	$P_{g2}(\text{bar})$	右边结果
5	9.665×10^{-3}	0.00373	8.691×10^{-3}
10	6.458×10^{-3}	0.01228	1.227×10^{-3}
15	3.237×10^{-3}	0.01706	1.713×10^{-3}
.....
6	9.059×10^{-3}	0.00935	9.314×10^{-3}

又一次得到结果应处于 5°C 和 6°C 之间。

(b) 由 (a) 中右边结果的最终值得到所加水量为 $\omega_2 = 0.622 \times$ 右边结果。

- 9.66^D 70°C 的绝干空气放在一绝热容器中, 喷入水使之刚好饱和。利用图 F4, 求: (a) 最终温度 ($^\circ\text{F}$); (b) 喷入的水量 ($\text{lb}_m \text{H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{da}$)。

解 如图 9-6 所示, 该过程沿经过 70°F 干球温度的等焓倾斜线从一个端点 (绝干, 1) 到另一个端点 (饱和, 2)。

(a) 等焓线与饱和温度边界交于 $T_2 \approx 43.4^\circ\text{F}$ 。

(b) 由于初始含水量为零, 最终含湿量即为所加的水。从 43.3°F 的饱和点向右作水平线, 与右边的含湿量轴交于 $41.8 \text{ grains H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{da}$ 或 $0.00595 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{da}$ 。(将前一结果除以 $7000 \text{ grains H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{H}_2\text{O}$, 得 $0.00597 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{da}$ 。)

- 9.67^D 利用表 F2, 重解题 9.66。

解 (a) 参照图 9-6, 因 $\omega_1 = 0, h_1 = h_{a1} = 16.818 \text{ Btu} / \text{lb}_m$ 。故 $16.818 = h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{g2}$ 。采用试算法, 可从这隐含公式中求得 T_2 。

在 43°F , $h_{a2} + \omega_2 h_{g2} = 10.330 + (0.00584)(1080.0) = 16.637$ (太低)

在 44°F , $h_{a2} + \omega_2 h_{g2} = 10.570 + (0.00607)(1080.4) = 17.128$ (太高)

假定为线性插值, $T_2 = 43 + [(16.818 - 16.637) / (17.128 - 16.637)](1) = 43.37^\circ\text{F}$ 。

(b) 因初始含湿量为零, 喷入的水为

$$\omega_2 = \omega_g = (0.00584 + (0.37)(0.00607 - 0.00584)) = 0.00593 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{da}$$

- 9.68^D 利用表 F1 的适当公式, 重解题 9.66。

解 (a) 按图 9-6 中的记号, $h_1 = h_{a1} = (0.24027)(70) = 16.819 \text{ Btu} / \text{lb}_m$; 因此,

$$16.819 = h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{g2} = (0.24027)T_2 + [(0.6220P_{g2}) / (P - P_{g2})](1061.7 + 0.43667T_2) \quad (1)$$

因假定 $P = 14.70 \text{ psia}$ 和 P_{g2} 可用与 T_2 有关的双常数或三常数蒸汽压公式表示, 式(1)可方便地用牛顿法求解 (参见题 7.111)。这里则用试算法解。首先假定 $T_2 = 43^\circ\text{F}$, 则

$$16.819 = (0.24027)(43) + \omega_2 [1061.7 + (0.43667)(43)]$$

故 $\omega_2 = 6.004 \times 10^{-3}$

$$P_{g2} = \omega_2 P / (\omega_2 + 0.6220) = (6.004 \times 10^{-3})(14.70) / (0.0060 + 0.6220) = 0.1405 \text{ psia}$$

利用双常数公式, $\ln 0.1405 = -1.96255 = 17.01523 - (9549.5 / T_2)$

即 $T_2 = 503.19^\circ\text{R} = 43.50^\circ\text{F}$ (不满足)

再假定为 44°F , 重复上述过程, 求得最终结果为 $T_2 = 43.3^\circ\text{F}$ 。

(b) 对应于 $T_2 = 43.4^\circ\text{F}$, $\omega_2 = 0.00596 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{da}$ 。由于 $\omega_1 = 0$, ω_2 就是加水量。

- 9.69^D 利用绝热饱和方程, 重解题 9.66。

解 (a) 按图中 9-6 中的记号, 绝热饱和方程为

$$\omega_1 (h_{a1} - h_{f2}) = c_p (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{f2}$$

式中, $T_1 = 70^\circ\text{F}$, $\omega_1 = 0$, $h_{a1} = 1091.8 \text{ Btu} / \text{lb}_m$, $c_p = 0.24027 \text{ Btu} / \text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 得到下面关于 T_2 的关系式:

$$(0.24027)(70 - T_2) = \omega_2 h_{f2} \quad (1)$$

公式(1)的试算结果示于表 9-3。

表 9-3

$T_2/^\circ\text{F}$	左边结果	ω_2	$h_{f,2}$	右边结果	左右关系
43	6.487	0.00584	1069.0	6.243	右<左
44	6.247	0.00607	1068.4	6.485	右>左

转向点出现在 43°F 和 44°F 之间,在这两个温度下,方程两边的差别分别是 -0.244 和 0.238,因此可得解为 $T_2 \approx 43.5^\circ\text{F}$.

(b)在此温度下, $\omega_2 = 0.00584 + (0.5)(0.0023) = 0.00596 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{da}$

因 $\omega_1 = 0$,故 ω_1 就代表了所加水量.

9.70^D 利用 Carrier 方程,重解题 9.66.

解 (a)按图 9-6 的记号,Carrier 方程可写成

$$\frac{70^\circ\text{F} - T_2}{2800^\circ\text{F} - (1.3)T_2} = \frac{P_{g2}}{(14.70\text{psia}) - P_{g2}}$$

式中 P_{g2} 可以作为 T_2 的函数由双常数蒸汽压公式估计,试算结果示于表 9-4.

表 9-4

$T_2/^\circ\text{F}$	左边结果	右边结果	$10^3(\text{左边}-\text{右边})$
43	9.839×10^{-3}	9.386×10^{-3}	+453
44	9.479×10^{-3}	9.756×10^{-3}	-277

由线性插值,得 $T_2 \approx 43.6^\circ\text{F}$ 时,最后一栏为零.

(b)在 43.6°F,表 9-4 插值给出右边结果 $= 9.608 \times 10^{-3}$,因此

$$\omega_2 = 0.622 \times \text{右边结果} = 5.98 \times 10^{-3} \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{da}$$

9.71^D 在某一特定的流动过程中,单位时间内 100kg 的绝干空气和 100kg 干饱和湿空气混合,得到相对湿度为 50%,20°C 的湿空气.利用图 F5,求:(a)湿空气的初始温度(°C);(b)最终混合物的露点温度(°C);(c)最终混合物的分子量(kg/kmol).

解 (a)图 9-7 给出了干饱和空气(1),绝干空气(2)和混合湿空气(3)的条件.点 3 的坐标为已知.所给题意并不保证一定满足等焓的假定.但是,如题 9.72(a)所证实的,最终混合湿空气的含湿量将约为干饱和空气含湿量(ω_1)的一半.由于图中显示 ω_1 约为 $0.0072 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg da}$, $\omega_1 \approx 2(0.0072) = 0.0144 \text{ kgH}_2\text{O}/\text{kg da}$.在该点, $T_1 \approx 19.6^\circ\text{C}$.

(b)按惯例,从最终状态点向左作水平线,求得露点温度为 $T_{\text{dew}} \approx 9.0^\circ\text{C}$.

(c)对 200kg 混合湿空气, $\omega_3 = 0.0072 = m_{w3}/(200 - m_{w3})$,因此, $m_{w3} = 1.43 \text{ kgH}_2\text{O}$,求得 $m_{a3} = 200 - 1.43 = 198.57 \text{ kg da}$,所以

$$M_{\text{mix}} = \frac{m_{a3} + m_{w3}}{(m_{a3}/M_a) + (m_{w3}/M_{\text{H}_2\text{O}})} = \frac{200}{(198.57/28.97) + (1.43/18.02)} = 28.845 \text{ kg/kmol}$$

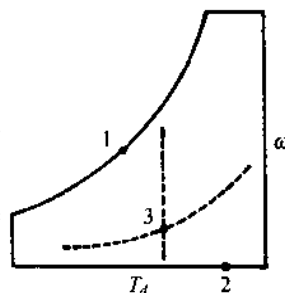


图 9-7

9.72^D 利用表 F3,重解题 9.71.

解 (a)由图 9-7,状态 3 的含水量与状态 1 的含水量相等(因状态 2 是绝干空气),所以, $\omega_3 m_{a3} = \omega_1 m_{a1}$,即

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{m_{a1}}{m_{a3}} = \frac{m_1/(1 + \omega_1)}{m_3/(1 + \omega_3)} \quad (1)$$

式中 m_1 和 m_3 分别表示干饱和湿空气和混合湿空气的总质量.在本题中, $m_3 = 2m_1$,故由式(1)得

$$\omega = \frac{2\omega_3}{1 + \omega_3} \quad (2)$$

由式(2),初始含湿量略高于终了含湿量的两倍.现由终了条件,得

$$P_{a3} = 0.02339 \text{ bar}, \quad P_{w3} = \phi_3 P_{a3} = (0.50)(0.02339) = 0.01170 \text{ bar}$$

$$\omega_3 = (0.6220)P_{w3}/(P - P_{w3}) = (0.6220)(0.01170)/(1.01325 - 0.01170) = 0.00727$$

所以,由式(2), $\omega_1 = 2\omega_2/(1-\omega_2) = 2(0.00727)/(1-0.00727) = 0.01465 \text{ kgH}_2\text{O/kgda}$

由于气流 1 是干饱和的,温度 T_1 可由 ω_x 一栏插值得到:在 19°C , $\omega_x = 0.01385$; 在 20°C , $\omega_x = 0.01476$; 因此

$$T_1 = 19 + [(0.01465 - 0.01385)/(0.01476 - 0.01385)](1) = 19.9^\circ\text{C}$$

[题 9.71 基于含湿量对半分的图解结果,与此差 0.3°C]

(b)露点温度下饱和蒸汽压和湿空气中的蒸汽分压相等,已求得 $P_{v3} = 0.01170\text{bar}$,则由表 F3,露点温度为

$$9 + [(0.01170 - 0.01148)/(0.01228 - 0.01148)](1) = 9.3^\circ\text{C}$$

(c)在题 9.71(c)中, $\omega_3 = 0.0072$ 可得 $M_{\text{mix}} = 28.845$,本题 $\omega_3 = 0.00727$ 将给出基本相同的结果。

9.73 利用题 9.72 式(2)和表 F1 中适当的公式,重解题 9.71.

解 在状态 3(20°C),

$$\ln P_{g3} = 12.19286 - [4109.1/(20 + 273.15 - 35.50)] = -3.75552$$

即 $P_{g3} = 0.02339\text{bar}$,故 $P_{v3} = \phi_3 P_{g3} = (0.50)(0.02339) = 0.01169\text{bar}$

$$\omega_3 = (0.6220)P_{v3}/(P - P_{v3}) = (0.6220)(0.01169)/(1.01325 - 0.01169) = 0.00726$$

$$\omega_1 = 2\omega_3/(1-\omega_3) = 2(0.00726)/(1-0.00726) = 0.01463$$

由于混合过程不一定绝热,湿空气的温度 T_1 不能从绝热饱和方程得到,而必须采用试算法:先假定一个 T_1 值,用三常数公式计算 $P_{g1} = P_{v1}$ (干饱和空气),然后观察 P_{v1} 是否给出正确的 $\omega_1 = 0.01463$. 因此,若先设 $T_1 = T_3 = 20^\circ\text{C}$ (略高),则由上述步骤得 $P_{g1} = P_{v1} = 0.02339\text{bar}$,因此

$$\omega_1 = (0.6220)P_{v1}/(P - P_{v1}) = (0.6220)(0.02339)/(0.98986) = 0.01470$$

(b)在露点,饱和蒸汽压等于水蒸气分压,这里为 0.01169bar . 则 $\ln 0.01169 = -4.44902 = 12.19286 - [4109.1/(T_{\text{dew}} - 35.50)]$,即 $T_{\text{dew}} = 282.41\text{K} = 9.3^\circ\text{C}$.

(c)由(a)得 $\omega_3 = 0.00726$,因而 M_{mix} 值和题 9.71(c)的计算结果无明显差别。

9.74 题 9.71 的混合现为绝热的,计算绝干空气温度 T_2 ($^\circ\text{C}$).

解 参照图 9-7. 由题 9.72 知,状态 1 坐标为 $T_1 = 19.9^\circ\text{C}$, $\omega_1 = 0.01465$. 状态 3 坐标为 $T_3 = 20^\circ\text{C}$, $\omega_3 = 0.00727$. 混合是绝热的,可利用总焓守恒确定状态 2. 因此, $H_3 = H_1 + H_2$, 即

$$m_{a3}(h_{a3} + \omega_3 h_{g3}) = m_{a1}(h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) + m_{a2} h_{a2} \quad (1)$$

而 $m_{a3} = m_3/(1 + \omega_3)$, $m_{a1} = m_1/(1 + \omega_1)$, $m_{a2} = m_1$, $m_3 = 2m_1$, 因此,在式(1)中消去质量,得

$$\begin{aligned} h_{a2} &= [2/(1 + \omega_3)](h_{a3} + \omega_3 h_{g3}) - [1/(1 + \omega_1)](h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) \\ &= (2/1.00727)[20.121 + (0.00727)(2537.2)] \\ &\quad - (1/1.01465)[20.020 + (0.01465)(2537.0)] \\ &= 20.214\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

通过插值,可知这一 h_a 值在 $T_2 = 20 + [(20.214 - 20.121)/(21.127 - 20.121)](1) = 20.09^\circ\text{C}$ 时取得。

9.75^D 在某一特定流动过程中,单位时间内 40 lb_m 绝干空气与 80 lb_m 干饱和湿空气混合,得到相对湿度为 40%, 65°F 的湿空气. 利用图 F4,求湿空气的初始温度 ($^\circ\text{F}$).

解 参见题 9.71(a)和图 9-7. 两种空气质量不一样不会从本质上影响解题. 对 $m_1/m_3 = 80/120$, 题 9.72 式(1)给出

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 3\omega_3/(2-\omega_3) = [3(36.5/7000)]/[2-(36.5/7000)] = 0.00784 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{da} \\ &= 54.9 \text{ grainsH}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{da} \end{aligned}$$

(从图中可很容易以 grain 为单位读数)在饱和曲线上找到该点,对应温度为 $T_1 \approx 50.8^\circ\text{F}$.

9.76^D 假定总压强为 14.70 psia , 利用表 F2 重解题 9.75.

解 在状态 3(65°F), $P_{g3} = 0.30575 \text{ psia}$, $P_{v3} = (0.40)(0.30575) = 0.1223 \text{ psia}$

$$\omega_3 = (0.6220)P_{v3}/(P - P_{v3}) = (0.6220)(0.1223)/(14.70 - 0.1223) = 0.00522 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{da}$$

$$\omega_1 = 3(0.00522)/(2 - 0.00522) = 0.00785 \text{ lb}_m \text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{da} \text{ (由题 9.75).}$$

假定线性插值, $\omega_x = \omega_1$ 时, $T_1 = 50 + [(0.00785 - 0.00763)/(0.00792 - 0.00763)](1) = 50.8^\circ\text{F}$.

冷却塔

9.77^D 35°C 的水以 $250\,000 \text{ kg/h}$ 的流量进入冷却塔,并被冷却至 17.5°C . 在塔中水与大气压

下的空气交换能量. 进塔空气参数是 15°C , 相对湿度 30%, 出塔参数是 30°C , 相对湿度 85%. 假定所有过程都在大气压下进行, 利用图 F5 求: (a) 绝热塔工作所需的空气质量流量 (kg/h); (b) 所需的补充水量 (kg/h); (c) 补充水占总水流的百分比. 假定水的平均比热是 $4.19\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$.

解 (a) 利用图 9-8 的流程图. 入口温度为

35°C 的水被冷却至 17.5°C , 故 $\dot{Q} = \dot{m}c\Delta T = (250000\text{kg/h})(4.19\text{kJ/kg}\cdot\text{K})[(17.5-35)\text{K}] = -1.833 \times 10^7\text{kJ/h}$. 现在计算空气流得到的热量. 在入口 (点 3), 图 F5 给出湿空气的比焓约为 23.2kJ/kg ; 在出口 (点 4) 则约为 88.7kJ/kg . 令 \dot{m}_a 为空气的质量流量, 水失去的热量等于空气得到的热量, $1.833 \times 10^7\text{kJ/h} = \dot{m}_a [(88.7 - 23.2)\text{kJ/kg}]$. 因此, $\dot{m}_a = 279900\text{kg/h}$.

(b) 由图知, 空气的含湿量由 $\omega_3 \approx 0.0032$ 增至 $\omega_4 \approx 0.0230\text{kgH}_2\text{O/kg da}$. 所以, 空气中水的增量为 $\dot{m}_a(\omega_4 - \omega_3) = (279900)(0.0198) = 5542\text{kg/h}$, 这就是所需的补充水量.

(c) $5542/250000 = 2.2\%$.

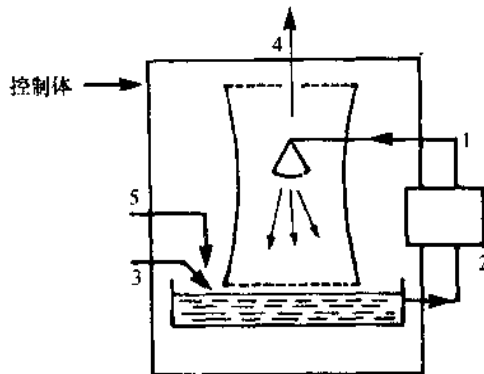


图 9-8

9.78^D 利用表 F3, 重解题 9.77.

解 (a) 参照图 9-8, 由表知, 水流失去的热量为 $\dot{m}(h_{f1} - h_{f2}) = (250000)(146.6 - 73.4) = 1.835 \times 10^7\text{kJ/h}$. 对入口湿空气, $P_{g3} = 0.017056\text{bar}$, $P_{a3} = \phi_3 P_{g3} = (0.30)(0.017056) = 0.00512\text{bar}$; $\omega_3 = (0.622)P_{a3}/(P - P_{a3}) = (0.622)(0.00512)/(1.0135 - 0.00512) = 0.00316\text{kgH}_2\text{O/kg da}$. 通过类似的计算可得 $\omega_4 = 0.02297\text{kgH}_2\text{O/kg da}$. 因此, $h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{g3} = 15.090 + (0.00316)(2528.0) = 23.078\text{kJ/kg da}$ 和 $h_4 = h_{a4} + \omega_4 h_{g4} = 30.185 + (0.02297)(2553.5) = 88.839\text{kJ/kg da}$. 令水失去的热量与湿空气得到的热量相等, 即 $1.835 \times 10^7\text{kJ/h} = \dot{m}_a [(88.839 - 23.078)\text{kJ/kg}]$, 解得 $\dot{m}_a = 279040\text{kg/h}$.

(b) 空气流中水的增量为 $\dot{m}_a(\omega_4 - \omega_3) = (279040)(0.01981) = 5528\text{kg/h}$; 这就是所需的补充水量.

(c) $5528/250000 = 2.2\%$

9.79 利用表 F1, 重解题 9.77.

解 (a) 如同题 9.77(a), 水从 35°C 冷却到 17.5°C 时放出的热量为 $1.833 \times 10^7\text{kJ/h}$. 对点 3 的湿空气, 双常数蒸汽压方程给出

$$\ln P_{g3} = 14.43509 - 5333.3/288.15 = -4.07367 \quad \text{即} \quad P_{g3} = 0.01701\text{bar}$$

则

$$P_{a3} = \phi_3 P_{g3} = (0.30)(0.01701) = 0.00510\text{bar}$$

$$\omega_3 = (0.6220)P_{a3}/(P - P_{a3}) = (0.6220)(0.00510)/(1.00815) = 0.00315\text{kgH}_2\text{O/kg da}$$

对在点 4 的出口湿空气流重复上述计算, 得

$$\omega_4 = 0.02300\text{kgH}_2\text{O/kg da}$$

因此, $h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{g3} = (1.006)(15) + (0.00315)[2501 + (1.83)(15)] = 23.06\text{kJ/kg}$

用同样的方法求得 $h_4 = 88.98\text{kJ/kg}$. 现令水流失去的热量等于空气流得到的热量, 有

$$1.833 \times 10^7\text{kJ/h} = \dot{m}_a [(88.98 - 23.06)\text{kJ/kg}] \text{ 或 } \dot{m}_a = 278060\text{kg/h}$$

(b) 空气中水的增量为

$$\dot{m}_a(\omega_4 - \omega_3) = (278060)(0.01985) = 5520\text{kg/h}$$

(c)

$$5520/250000 = 2.2\%$$

9.80^D 100°F 的水以 $500000\text{ lb}_m/\text{hr}$ 的流量进入冷却塔, 并被冷却至 60°F . 在塔中水与大气压下的空气交换能量. 进塔空气参数是 55°F , 相对湿度 30%, 出塔参数是 85°F , 相对湿度 90%. 假定所有过程都在大气压下进行, 并绝热. 利用图 F4 求: (a) 空气的质量流量 (lb_m/hr); (b) 所需的补充水量 (lb_m/hr); (c) 补充水占总水流的百分比. 假定水的平均比热是 $1\text{Btu/lb}_m\cdot^{\circ}\text{F}$.

解 (a)按图 9-8 的记号, 图 F4 给出口空气 $h_3 \approx 16.08 \text{ Btu/lb}_m$, $\omega_3 = 0.0027 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$; 出口空气 $h_4 \approx 46.68 \text{ Btu/lb}_m$ 和 $\omega_4 = 0.0239 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$. 故空气流得到的热量为 $h_4 - h_3 = 30.6 \text{ Btu/lb}_m$. 另一方面, 水流的散热率为 $\dot{m}_c \Delta T = (500000)(1)(40) = 2 \times 10^7 \text{ Btu/hr}$. 将水流动失去的热量与空气得到的热量相等, 有 $(30.6)\dot{m}_a = 2 \times 10^7$, 因此, $\dot{m}_a = 6.536 \times 10^5 \text{ lb}_m/\text{hr}$.

(b)空气中水的增量为 $\dot{m}_a(\omega_4 - \omega_3) = (6.536 \times 10^5 \text{ lb}_m/\text{hr})(0.02125 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}) = 13889 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/hr}$, 这就是所需的补充水量.

(c) $13889/500000 = 2.78\%$

9.81^D 利用表 F2, 重解题 9.80.

解 (a)参见图 9-8, 由表知, 水流失去的热量为

$$\dot{m}(h_{f1} - h_{f2}) = (500000)(68.0 - 28.1) = 1.995 \times 10^7 \text{ Btu/hr}$$

对入口的湿空气,

$$P_{a3} = 0.21410 \text{ psia}, \quad P_{a3} = \phi_3 P_{g3} = (0.30)(0.21410) = 0.06423 \text{ psia}$$

$$\omega_3 = 0.622 P_{a3} / (14.70 - P_{a3}) = 0.00273 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$$

对出口空气进行类似的计算可得 $\omega_4 = 0.02358 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O/lb}_m \text{ da}$

因此入口和出口空气的比焓分别为

$$h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{g3} = 13.213 + (0.00273)(1085.2) = 16.175 \text{ Btu/lb}_m$$

$$h_4 = h_{a4} + \omega_4 h_{g4} = 20.424 + (0.02358)(1098.2) = 46.320 \text{ Btu/lb}_m$$

令水失去的热量等于空气得到的热量, 有

$$1.995 \times 10^7 = \dot{m}_a(46.320 - 16.175) \quad \text{即} \quad \dot{m}_a = 6.618 \times 10^5 \text{ lb}_m/\text{hr}$$

(b)空气中水的增量为 $\dot{m}_a(\omega_4 - \omega_3) = (6.618 \times 10^5)(0.02085) = 13800 \text{ lb}_m/\text{hr}$

(c) $13800/500000 = 2.76\%$

再加热去湿

9.82^D 相对湿度为 70%, 30°C 的空气冷却后再加热到相对湿度 40%, 22°C. 假定总压恒定为 1.01325 bar, 利用图 F5 求: (a) 过程中所需的最低温度 (°C); (b) 过程中去除的水量 (kg/kg da).

解 该过程被示于图 9-9. 在图上确定点 1, 求得 $\omega_1 \approx 0.0188$. 确定点 4, 得 $\omega_4 \approx 0.0067$, 从点 4 水平向左移动与饱和边界相交, 求得 $T_{d3} \approx 7.6^\circ\text{C}$, 因此,

(a) 所需理想最低温度为 7.6°C.

(b) 去除的水量为 $\omega_2 - \omega_3 = \omega_1 - \omega_4 = 0.0188 - 0.0067 = 0.0121 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$.

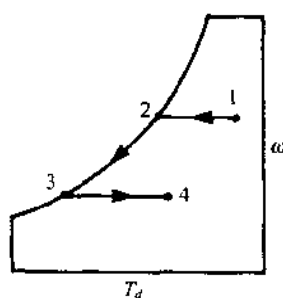


图 9-9

9.83^D 利用表 F3, 重解题 9.82.

解 (b)参照图 9-9, 在起始点, $P_{g1} = 0.04246 \text{ bar}$; $P_{a1} = \phi_1 P_{g1} =$

$$(0.70)(0.04246) = 0.02972 \text{ bar}; \quad \omega_1 = (0.6220) P_{a1} / (P - P_{a1}) =$$

$(0.6220)(0.02972) / (1.01325 - 0.02972) = 0.01880$. 同样, 在终点, 求得 $\omega_4 = 0.00656 = \omega_3$, 因此, 去除的水量为 $\omega_1 - \omega_3 = 0.01224 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$.

(a)在点 3 时温度最低, 这时湿空气饱和(在露点). 所以, 从表中搜寻 $\omega_g = \omega_3 = 0.00656$ 所对应的温度, 利用线性插值, 得 $T_3 = 7 + [(0.00656 - 0.00624) / (0.00668 - 0.00624)](1) = 7.7^\circ\text{C}$.

9.84 利用表 F1 公式, 重解题 9.82.

解 (b)参照图 9-9. 在点 1,

$$\ln P_{g1} = 12.19286 - [4109.1 / (303.15 - 35.50)] = 3.15965$$

即 $P_{g1} = 0.04244 \text{ bar}$, $P_{a1} = \phi_1 P_{g1} = (0.70)(0.04244) = 0.029708 \text{ bar}$

$$\omega_1 = (0.6220) P_{a1} / (P - P_{a1}) = (0.6220)(0.029708) / (1.01325 - 0.029708) = 0.01879$$

类似地, 在点 4, 计算得 $\omega_4 = 0.00656$. 因此, 去除的水量是

$$\omega_1 - \omega_4 = 0.01223 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$$

(a)在点3时的温度最低,此时水蒸气的分压等于饱和蒸汽压.分压为 $P_{v,3}=0.01058\text{bar}$,所以

$$\ln P_{v,3} = -4.5879 = 12.19286 - [4109.1/(T_3 - 35.50)]$$

由此解得

$$T_3 = 280.94\text{K} = 7.8^\circ\text{C}$$

- 9.85^D 相对湿度为75%,90°F的空气被冷却后又重加热至70°F,相对湿度为40%.假定总压恒定,为14.7psia,利用图F4,求:(a)过程所需的最低温度(°F);(b)过程中去除的水量($\text{lb}_m\text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{da}$).

解 参见图9-9.已知点1和点4的坐标,故可求得

$$\omega_1 \approx 0.023\text{lb}_m\text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{da} \text{ 和 } \omega_4 \approx 0.0066\text{lb}_m\text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{da}$$

(a) $\omega=\omega_1$ 的水平线与饱和边界交于 $T_{d,1} = 44.8^\circ\text{F}$.

(b) 去除的水量为 $\omega_2 - \omega_3 = \omega_1 - \omega_4 = 0.016\text{lb}_m\text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{da}$

- 9.86^D 利用表F2,重解题9.85.

解 (b)参见图9-9.在点1(90°F),

$$P_{v,1} = 0.69890\text{psia}, \quad P_{v,1} = \phi_1 P_{s,1} = (0.75)(0.69890) = 0.5242\text{psia}$$

$$\omega_1 = (0.622)P_{v,1}/(P - P_{v,1}) = (0.622)(0.5242)/(14.7 - 0.5242) = 0.0230\text{lb}_m\text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{da}$$

对终点4重复上述计算,求得 $\omega_4 = 0.00621\text{lb}_m\text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{da}$. 因此,除去的水量为 $\omega_1 - \omega_4 = 0.0168\text{lb}_m\text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{da}$.

(a)对含湿量 $\omega_3 = \omega_4 = 0.00621\text{lb}_m\text{H}_2\text{O}/\text{lb}_m\text{da}$ 的饱和湿空气,对含湿量 ω_3 作插值可求得其对应的温度

$$T_3 = 44 + [(0.00621 - 0.00607)/(0.00631 - 0.00607)](1) = 44.6^\circ\text{F}$$

加热或冷却

- 9.87 露点温度为14°C的饱和湿空气通过管道时被加热至相对湿度为20%.空气压力假定保持在1.01325bar不变,利用图F5,求:(a)终了温度(°C);(b)所加热量($\text{kJ}/\text{kg da}$).

解 (a)在饱和边界上确定露点为 $T_d = 14^\circ\text{C}$. 加热饱和湿空气不影响含湿量(冷却有可能会). 故过露点沿着等 ω 水平线左移直至与相对湿度为20%的曲线相交. 可读出 $T_d \approx 41.7^\circ\text{C}$.

(b)过初始露点向左上方移动直至与焓的标度轴相交,得 $h_1 \approx 39.4\text{kJ}/\text{kg}$; 对终了条件重复上述过程,解得 $h_2 \approx 68.5\text{kJ}/\text{kg}$. 没有功的相互作用,也缺乏管道直径等信息,不能计算动能和势能. 因此,稳定流动能量方程给出,对每公斤干空气, $q = h_2 - h_1 = 68.5 - 39.4 = 29.1\text{kJ}/\text{kg da}$

- 9.88^D 利用表F3,重解题9.87.

解 (a)在露点(14°C),

$$h_1 = h_a + \omega_1 h_g = 14.084 + (0.01001)(2526.2) = 39.371\text{kJ}/\text{kg}$$

由于加热初始饱和湿空气不改变含湿量 $\omega_2 = \omega_1 = 0.01001$; 因此,在终点, $P_{v,2} = \omega_2 P / (\omega_2 + 0.6220) = (0.01001)(1.01325) / (0.01001 + 0.6220) = 0.01605\text{bar}$, $P_{s,2} = P_{v,2} / \phi_2 = 0.01605 / 0.20 = 0.08024\text{bar}$. 通过插值,求得此蒸汽压对应的温度为 $T_2 = 41 + [(0.08024 - 0.07784) / (0.08205 - 0.07784)](1) = 41.6^\circ\text{C}$.

(b)如题9.87(b)所解释的, $q = h_2 - h_1$, 因含湿量保持不变, $h_2 - h_1 = (h_{a,2} - h_{a,1}) + \omega(h_{g,2} - h_{g,1}) = (41.865 - 14.084) + (0.01001)(2576.2 - 2526.2) = 28.282\text{kJ}/\text{kg da}$.

- 9.89 利用表F1公式,重解题9.87.

解 (a)初始条件(露点)的特征为 $P_{v,1} = P_{s,1}$. 所以三常数蒸汽压方程给出

$$\ln P_{v,1} = 12.19286 - [4109.1/(287.15 - 35.50)] = -4.13696 \quad \text{即} \quad P_{v,1} = 0.01597\text{bar}$$

由此得, $\omega_1 = (0.6220)P_{v,1}/(P - P_{v,1}) = (0.6220)(0.01597)/(1.01325 - 0.01597) = 9.960 \times 10^{-3}$. 而 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, 故可反推出终了各参数, 先求

$$P_{v,2} = \omega P / (\omega + 0.6220) = P_{v,1} = 0.01597\text{bar}$$

$$P_{s,2} = P_{v,2} / \phi_2 = 0.01597 / 0.20 = 0.07985\text{bar}$$

由于 $P_{s,2}$ 已知, 可用三常数公式求得

$$\ln 0.07985 = -2.52761 = 12.19286 - [4109.1/(T_2 - 35.50)] \quad \text{即} \quad T_2 = 314.64\text{K} = 41.5^\circ\text{C}$$

(b) 由于湿空气在含湿量 ω 不变条件下加热, 可得

$$\begin{aligned} {}_1q_2 &= h_2 - h_1 = (h_{a2} - h_{a1}) + \omega(h_{g2} - h_{g1}) \\ &= 1.006(T_2 - T_1) + \omega[(2501 + 1.83T_2) - (2501 + 1.83T_1)] \\ &= (1.006 + 1.83\omega_1)(T_2 - T_1) \\ &= [1.006 + (9.960 \times 10^{-3})(1.83)](41.5 - 14) \\ &= 28.16 \text{ kJ/kg da} \end{aligned}$$

- 9.90 露点温度为 50°F 的饱和湿空气通过管道时被加热, 使其相对湿度变为 20%。空气压强假定保持在 14.70 psia。利用表 F2, 求: (a) 最终温度 (°F); (b) 所需热量 (Btu/lb_m da)。

解 (a) 在露点 (50°F) 湿空气饱和, 故

$$h_1 = h_{a1} + \omega_g h_{g1} = 12.012 + (0.00763)(1083.0) = 20.275 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$$

加热初始饱和湿空气, 含湿量保持不变,

$$\omega_2 = \omega_1 = \omega = 0.00763 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O} / \text{lb}_m \text{ da}$$

因此, $P_{a2} = \omega P / (0.622 + \omega) = P_{a1} = P_{g1} = 0.17811 \text{ psia}$, $P_{g2} = P_{a2} / \phi_2 = 0.17811 / 0.20 = 0.89055 \text{ psia}$ 。由观察知 $97 < T_2 < 98^\circ\text{F}$; 通过插值得 $T_2 = 97 + [(0.89055 - 0.86779) / (0.89459 - 0.86779)](1) = 97.8^\circ\text{F}$ 。

(b) 在 97.8°F , $h_{a2} = 23.502 \text{ Btu/lb}_m$, $h_{g2} = 1103.7 \text{ Btu/lb}_m$; 因此, $h_2 = h_{a2} + \omega h_{g2} = 23.502 + (0.00763)(1103.7) = 31.923 \text{ Btu/lb}_m$ 。所以, ${}_1q_2 = h_2 - h_1 = 31.923 - 20.275 = 11.648 \text{ Btu/lb}_m \text{ da}$ 。

绝热混合

- 9.91 两股湿空气流作绝热混合, 一股的质量流量为 \dot{m}_1 , 含湿量为 ω_1 , 温度为 T_1 , 另一股具有类似的参数 \dot{m}_2, ω_2, T_2 。由入口参数求混合后生成气流的参数 \dot{m}_3, ω_3, T_3 。

解 对湿度测量中的混合问题, 若所有量都以单位质量的干空气为基准, 则分析要简单得多。因此, 对 $j=1, 2, 3$, $\dot{m}_j = \dot{m}_{aj} + \dot{m}_{wj} = \dot{m}_{aj} + \omega_j \dot{m}_{aj} = (1 + \omega_j) \dot{m}_{aj}$ 。现在, 总质量守恒首先给出

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 \quad (1)$$

这是期待的关系之一。其次, 水蒸气质量也是守恒的: $\dot{m}_{w3} = \dot{m}_{w1} + \dot{m}_{w2}$, 即 $\omega_3 \dot{m}_{a3} = \omega_1 \dot{m}_{a1} + \omega_2 \dot{m}_{a2}$ 。利用上述关系, 得

$$\frac{\omega_3}{1 + \omega_3} (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) = \frac{\omega_1}{1 + \omega_1} \dot{m}_1 + \frac{\omega_2}{1 + \omega_2} \dot{m}_2$$

由此解得

$$\omega_3 = \frac{(1 + \omega_2) \dot{m}_1 \omega_1 + (1 + \omega_1) \dot{m}_2 \omega_2}{(1 + \omega_2) \dot{m}_1 + (1 + \omega_1) \dot{m}_2} \quad (2)$$

最后, 可从对应焓之间的显式关系求得 T_3 和 T_1, T_2 之间的隐含关系。因为 $Q = W = \Delta KE = \Delta PE = 0$, 稳定流动能量方程给出 $\Delta H = 0$, 即 $\dot{m}_{a3} h_3 = \dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2$, 式中 $h_j = h_{aj} + \omega_j h_{gj}$ ($j=1, 2, 3$)。利用式 (2), 焓守恒关系成为

$$\begin{aligned} h_3 &= \frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a3}} h_1 + \frac{\dot{m}_{a2}}{\dot{m}_{a3}} h_2 = \frac{\dot{m}_1 (1 + \omega_3)}{\dot{m}_1 (1 + \omega_1) + \dot{m}_2 (1 + \omega_2)} h_1 + \frac{\dot{m}_2 (1 + \omega_3)}{\dot{m}_1 (1 + \omega_1) + \dot{m}_2 (1 + \omega_2)} h_2 \\ &= \left(\frac{\dot{m}_1}{1 + \omega_1} + \frac{\dot{m}_2}{1 + \omega_2} \right) \left[\frac{(1 + \omega_1)(1 + \omega_2)}{(1 + \omega_2) \dot{m}_1 + (1 + \omega_1) \dot{m}_2} \right] = \frac{(1 + \omega_2) \dot{m}_1 h_1 + (1 + \omega_1) \dot{m}_2 h_2}{(1 + \omega_2) \dot{m}_1 + (1 + \omega_1) \dot{m}_2} \end{aligned}$$

h_3 与 h_2, h_1 的组合关系和 ω_3 与 ω_2, ω_1 的组合关系一致表明, 在空气湿度图上, 混合点 3 正好处于两股入流状态点的连线上, 如图 9-10 所示。

- 9.92 流量为 100 kg/min, 相对湿度为 80%, 32.5°C 的湿空气流 (气流 1) 和流量为 120 kg/min, 相对湿度为 40%, 5°C 的湿空气流 (气流 2) 绝热混合。利用表 F3 求: 出口混合流 (气流 3) 的温度 (°C) 和相对湿度 (%). 假定整个过程的总压强为 1 atm。

解 对气流 1, $P_{g1} = (0.047578 + 0.050335)/2$

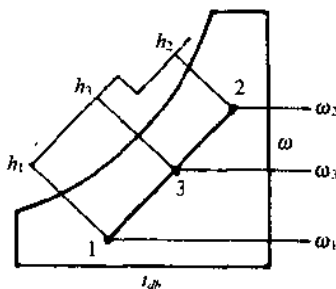


图 9-10

$$= 0.04896 \text{ bar};$$

$$P_{v1} = \phi_1 P_{s1} = (0.80)(0.04896) = 0.03917 \text{ bar}$$

$$\omega_1 = (0.622)(0.03917)/(1.01325 - 0.03917) = 0.02501$$

$$h_1 = h_{a1} + \omega_1 h_{s1} = 32.702 + (0.02501)(2559.9) = 96.725 \text{ kJ/kg da}$$

同样, 对气流 2,

$$P_{s2} = 0.00873 \text{ bar}$$

$$P_{v2} = \phi_2 P_{s2} = (0.40)(0.00873) = 0.00349 \text{ bar}$$

$$\omega_2 = (0.622)P_{v2}/(P - P_{v2}) = (0.622)(0.00349)/(1.01325 - 0.00349) = 0.00215$$

$$h_2 = h_{a2} + \omega_2 h_{s2} = 5.029 + (0.00215)(2509.7) = 10.425 \text{ kJ/kg da}$$

现由题 9.91 式(2)和(3)得到混合物的参数:

$$\omega_3 = \frac{(1.00215)(100)(0.02501) + (1.02501)(120)(0.00215)}{(1.00215)(100) + (1.02501)(120)} = 0.01246$$

$$h_3 = \frac{(1.00215)(100)(96.725) + (1.02501)(120)(10.425)}{(1.00215)(100) + (1.02501)(120)} = 49.174 \text{ kJ/kg da}$$

混合物的温度由 $49.174 = h_{a3} + (0.01246)h_{s3}$ 式隐含给出, 通过试算可得 $T_3 \approx 17.51^\circ\text{C}$, 在此温度,

$$P_{s3} = 0.02002 \text{ bar}$$

$$P_{a3} = \omega_3 P / (\omega_3 + 0.6220) = (0.01246)(1.01325) / (0.01246 + 0.6220) = 0.01990 \text{ bar}$$

$$\phi_3 = P_{a3} / P_{s3} = 0.01990 / 0.02002 = 99.4\%$$

- 9.93^D** 两股湿空气绝热混合. 气流 1 为干饱和(相对湿度为 100%) 50°F , 体积流量为 $900 \text{ ft}^3/\text{min}$. 气流 2 相对湿度 60%, 90°F , 体积流量为 $600 \text{ ft}^3/\text{min}$. 利用表 F2, 求: (a) 生成混合物的质量流量 (lb_m/min); (b) 最终相对湿度. 假定整个过程总压强是 1 atm .

解 (a) 对气流 1, $P_{s1} = P_{a1} = 0.17811 \text{ psia}$, 故 $\omega_1 = (0.622)P_{v1}/(P - P_{v1}) = (0.622)(0.17811)/(14.696 - 0.17811) = 0.00763 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{ da}$. 因此, 1 lb_m 干空气和 $0.00763 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}$ 的混合物的分子量为

$$M_1 = \frac{\text{总质量}}{\text{总摩尔数}} = \frac{1.00763}{(1/28.966) + (0.00763/18.016)} = 28.839 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole}$$

在大气压和 50°F 下, 将理想气体公式应用于这一湿空气混合物, 得

$$\dot{m}_1 = \frac{V_1 M_1 P_1}{R_a T_1} = \frac{(900 \text{ ft}^3/\text{min})(28.839 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole})(14.696 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2)}{(1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \text{ mole} \cdot ^\circ\text{R})(509.69^\circ\text{R})} = 69.75 \text{ lb}_m/\text{min}$$

对气流 2 作相同的计算 ($P_{s2} = \phi_2 P_{s2} = (0.60)(0.69890) = 0.41934 \text{ psia}$) 可得 $\dot{m}_2 = 42.84 \text{ lb}_m/\text{min}$. 因此, $\dot{m}_3 = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = 69.75 + 42.84 = 112.6 \text{ lb}_m/\text{min}$.

(b) 为了求出口气流的相对湿度, 必须先求它的焓, 进而求得它的温度.

由(a)中计算得 $\omega_1 = 0.00763$, $\omega_2 = 0.01827$; $h_1 = 20.275 \text{ Btu}/\text{lb}_m \text{ da}$, $h_2 = 41.73 \text{ Btu}/\text{lb}_m \text{ da}$; $\dot{m}_1 = 69.75 \text{ lb}_m/\text{min}$, $\dot{m}_2 = 42.84 \text{ lb}_m/\text{min}$, 则由题 9.91 式(2), (3)得

$$\omega_3 = \frac{(1.01827)(69.75)(0.00763) + (1.00763)(42.84)(0.01827)}{(1.01827)(69.75) + (1.00763)(42.84)} = 0.01165$$

$$h_3 = \frac{(1.01827)(69.75)(20.275) + (1.00763)(42.84)(41.73)}{(1.01827)(69.75) + (1.00763)(42.84)} = 28.385 \text{ Btu}/\text{lb}_m \text{ da}$$

用试算法解 $28.385 = h_{a3} + (0.01165)h_{s3}$, 可确定 $T_3 \approx 65.31^\circ\text{F}$, 在 65.31°F , $P_{s3} = 0.30575 + 0.00335 = 0.3091 \text{ psia}$; 因此

$$\phi_3 = P_{a3} / P_{s3} = 0.2709 / 0.3091 = 87.6\%$$

- 9.94** 两股湿空气绝热混合. 一股气流相对湿度为 85%, 85°F , 以 $150 \text{ ft}/\text{sec}$ 的速度流过直径 1 ft 的环形管. 第二股气流相对湿度为 45%, 65°F , 以 $120 \text{ ft}/\text{sec}$ 的速度流过一个直径也是 1 ft 的环形管. 利用表 F2 求: 混合后的质量流量 (lb_m/sec), 总压强为常数 14.69 psia .

解 对第一股气流, 由表 2 得: 在 85°F ,

$$P_{s1} = 0.59648 \text{ psia}$$

$$P_{v1} = \phi_1 P_{s1} = (0.85)(0.59648) = 0.50701 \text{ psia}$$

$$\omega_1 = (0.622)P_{v1}/(P - P_{v1}) = 0.02223 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{ da}$$

故分子质量为

$$M_1 = \frac{1 + 0.02223}{(1/28.996) + (0.02223/18.016)} = 28.591 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole}$$

而理想气体的连续性方程(题 5.2)给出

$$\dot{m}_1 = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\bar{v}_1 M_1 P_1}{R_u T_1} = \frac{\pi (1 \text{ ft})^2}{4} \frac{(150 \text{ ft/sec})(28.591 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole})(14.696 \times 144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2)}{(1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \text{ mole} \cdot ^\circ \text{R})(545 ^\circ \text{R})} = 8.472 \text{ lb}_m/\text{sec}$$

用相同方法解得 $\dot{m}_2 = 7.102 \text{ lb}_m/\text{sec}$, 因此, 混合后的出口质量流量为

$$\dot{m}_3 = 8.472 + 7.102 = 15.574 \text{ lb}_m/\text{sec}$$

范宁(Fanning)相互作用功

9.95 假定用一个 1.125kw 的风机给教室送风. 空气的相对湿度是 60%, 温度是 22.2°C, 体积流量是 0.50 m³/s. 求空气离开加热器的条件(ϕ , T). 忽略风机的损耗并假定总压强为 1.01325 bar.

解 令进入风机的空气的状态为 1, 离开时为 2, 则

$$P_{g2} = 0.026778 \text{ bar}, \quad P_{v2} = \phi P_{g2} = (0.60)(0.026778) = 0.0160668 \text{ bar}$$

$$P_{a2} = P - P_{v2} = 1.01325 - 0.0160668 = 0.997183 \text{ bar}$$

对稳定流动的理想气体, $\dot{m} = MP \dot{V}/R_u T$, 分别对于空气和水蒸气应用此公式, 可得

$$\dot{m}_{a2} = M_a P_{a2} \dot{V}_2 / R_u T_2 = (28.966)(0.997183)(0.50) / (0.08314)(295.35) = 0.58812 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{v2} = M_v P_{v2} \dot{V}_2 / R_u T_2 = (18.016)(0.0160668)(0.50) / (0.08314)(295.35) = 0.00589 \text{ kg/s}$$

注意, 根据道尔顿定律, 上述计算中对于各分压的工质, 采用了总体积流量. 假定是绝热流动

$$\dot{m}_{a1} h_{a1} + \dot{m}_{v1} h_{v1} + \dot{W}_2 = \dot{m}_{a2} h_{a2} + \dot{m}_{v2} h_{v2}$$

由于通过风机时质量守恒,

$$\dot{W}_2 = \dot{m}_a (h_{a2} - h_{a1}) + \dot{m}_v (h_{v2} - h_{v1})$$

利用 $h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$, 对空气, 比热为 1.005 kJ/kg · K, 对水蒸气, 比热为 1.860 kJ/kg · K, 求得

$$\dot{W}_2 = 1.125 = [(0.58812)(1.005) + (0.00589)(1.860)](22.2 - T_1)$$

因此 $T_1 = 20.3^\circ \text{C}$. 忽略经过风机时压强的变化, 对点 1 和点 2 采用相同的分压, 求得

$$\phi = P_{v1} / P_{g1} = 0.0160668 / 0.023835 = 67.4\%$$

式中 $P_{g1} = 0.023835 \text{ bar}$ 是经过插值取得的在 20.3°C 时的饱和蒸汽压.

空气调节

9.96^D 相对湿度为 75%, 30°C 的湿空气进入一冷却器, 冷却器中, 喷入 10°C 的水, 整个过程假定是绝热的. 冷凝水在 15°C 下流出, 剩余的饱和湿空气被加热至 25°C, 相对湿度为 50% 的空调空气. 如果要产生 1500 m³/h 这样的空调空气, 所需的水的流量是多少(kg/h)? (利用图 F5 和表 F3.)

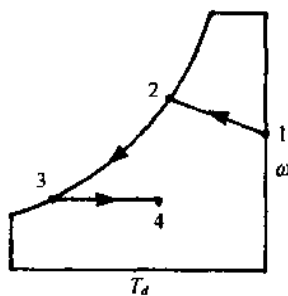


图 9-11

解 该过程如图 9-11 所示. 图中点 1 代表湿空气, 点 2 代表饱和状态, 点 3 为冷凝后的空气, 点 4 则为最后的空调空气. 在点 4,

$$P_{g4} = 0.031691 \text{ bar}, \quad P_{v4} = \phi_4 P_{g4} = (0.50)(0.031691) = 0.01585 \text{ bar}$$

假定出口总压比大气压高 0.5%,

$$P_4 = (1.005)(1.01325) = 1.01832 \text{ bar} \quad \text{即} \quad P_{a4} = 1.01832 - 0.01585 = 1.00247 \text{ bar}$$

现分别对出口干空气和入口水蒸气运用理想气体定律 $\dot{V} = \dot{m} R_u T / MP$, 得

$$\dot{V}_{a4} = \dot{m}_{a4} R_u T_4 / M_a P_{a4} = \dot{m}_{a4} (0.08314)(298.15) / (28.97)(1.00247) = (0.85353) \dot{m}_{a4}$$

$$\dot{V}_{v4} = \dot{m}_{v4} (0.08314)(298.15) / (18.02)(0.01585) = (86.7882) \dot{m}_{v4}$$

空调空气的总流量为

$$\dot{V}_4 = \dot{V}_{a4} + \dot{V}_{v4} \quad \text{即} \quad 1500 \text{ m}^3/\text{h} = (0.85354) \dot{m}_{a4} + (86.7882) \dot{m}_{v4}$$

出口空气的含湿量是 $\omega_1 = (0.622)P_{v1}/P_{a1} = (0.622)(0.01585)/1.00247 = 9.834 \times 10^{-3} = \dot{m}_{v1}/\dot{m}_{a1}$
解这两个关于 \dot{m}_{v1} 和 \dot{m}_{a1} 的线性方程, 得

$$\dot{m}_{v1} = 878.72 \text{ kg/h}, \quad \dot{m}_{a1} = 8.64 \text{ kg/h}$$

由于干空气的质量流量是恒定的, 入口空气所带水分可求出。在 30°C ,

$$P_{v1} = 0.042455 \text{ bar}, \quad P_{v1} = \phi_1 P_{g1} = (0.75)(0.042455) = 0.03184 \text{ bar}$$

假定入口压力同样为 1.01832 bar , 则

$$P_{a1} = P - P_{v1} = 1.01832 - 0.03184 = 0.98648 \text{ bar}$$

故 $\omega_1 = (0.622)P_{v1}/P_{a1} = (0.622)(0.03184)/0.98648 = 0.02008$

因此, 入口空气所带水分

$$\dot{m}_{v1} = \omega_1 \dot{m}_{a1} = 0.02008(878.72) = 17.64 \text{ kg H}_2\text{O/h}$$

冷却是喷水的结果, 让水在状态 5 下喷入, 冷凝水在状态 6 下离开。则由稳定流动方程, 对 1-5 混合过程,

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{15} &= \dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_{a1}(h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) = \dot{m}_5(42.0) + (878.72)[30.185 + (0.02008)(2553.5)] \\ &= 71580 + 42 \dot{m}_5 \end{aligned}$$

同样, 对 3-6 混合过程,

$$\dot{Q}_{36} = \dot{m}_6 h_6 + \dot{m}_{a3}(h_{a3} + \omega_3 h_{g3})$$

但

$$\dot{m}_{a3} = \dot{m}_{a4} = \dot{m}_{a1}, \quad \omega_3 = \omega_4$$

因此,

$$\dot{Q}_{36} = \dot{m}_6(62.9) + (878.72)[15.090 + (9.834 \times 10^{-3})(2528.0)] = 62.9 \dot{m}_6 + 35105$$

对绝热冷却, $\dot{Q}_{15} = \dot{Q}_{36}$, 由此得 $(62.9)\dot{m}_6 - (42)\dot{m}_5 = 36475$, 而 $\dot{m}_6 - \dot{m}_5 = \dot{m}_{v1} - \dot{m}_{v4} = 17.64 - 8.64 = 9$ 。由上两式消 \dot{m}_6 , 解得 $\dot{m}_5 = 1718 \text{ kg/h}$ 。

- 9.97 题 9.96 中在 15°C 的冷空气被加热至 25°C , 相对湿度为 50% 的空调空气, 所需的加热功率是多少(kW)?

解 由 $\dot{Q}_2 = \dot{m} \Delta h = \dot{m}_a [h_{a2} - h_{a1} + \omega_1(h_{g2} - h_{g1})] = (878.72)[(25.153 - 15.090) + (9.834 \times 10^{-3})(2546.3 - 2528.0)] = 9001 \text{ kJ/h} = 2.50 \text{ kW}$ 。

- 9.98 题 9.96 中, 入口湿空气的体积流量是多少(m^3/h)?

解 由题 9.96 知, $\dot{m}_1 = \dot{m}_{a1} + \dot{m}_{v1} = 878.72 + 17.64 = 896.36 \text{ kg/h}$, 含湿量是 $\omega_1 = 0.02008 \text{ kg H}_2\text{O/kg da}$ 。因此, 湿空气的有效分子质量是

$$M_1 = 1.02008 / [(0.02008/18.02) + (1/28.97)] = 28.606$$

由理想气体定律得

$$\dot{V}_1 = \dot{m}_1 R_a T_1 / M_1 P_1 = (896.36)(0.08314)(303.15) / (28.606)(1.01832) = 775.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

- 9.99 相对湿度为 80%, 80°F 的湿空气进入一冷却器, 冷却器中, 喷入 50°F 的水。冷凝水在 60°F 下排出, 并将空气冷却。冷却的空气再被加热到 72°F , 相对湿度为 50% 的空调空气。如果进入冷却器的冷却水的流量是 $3500 \text{ lb}_m/\text{hr}$, 则所产生的空调空气的体积流量是多少(ft^3/min)? 假定冷却器工作总压为 14.75 psia , 利用图 F4 和表 F2。

解 参照图 9-11, 如同题 9.96, 按干空气质量守恒, 得 $\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a4}$, 在点 1 (相对湿度 80%, 85°F),

$$P_{v1} = 0.59648 \text{ psia}, \quad P_{v1} = \phi_1 P_{g1} = (0.80)(0.59648) = 0.47718 \text{ psia}$$

$$P_{a1} = P - P_{v1} = 14.75 - 0.4772 = 14.2728 \text{ psia}$$

$$\omega_1 = (0.622)P_{v1}/P_{a1} = (0.622)(0.47718)/14.2728 = 0.02080 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{ da}$$

对出口流体作类似的计算, 求得

$$\omega_4 = 0.00831 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{ da}$$

所以空气含湿量的减少量是 $0.01249 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{ da}$ 。

现对冷却器作热平衡 (参见题 9.96)。让干空气和喷入的水的质量流量分别为 \dot{m}_{a1} 和 $\dot{m}_5 = 3500/60 = 58.333$, 则输入的能量是

$$\dot{Q}_{15} = \dot{m}_{a1}(h_{a1} + \omega_1 h_{g1}) + \dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_{a1}[20.424 + (0.02080)(1098.2)] + \dot{m}_5(18.1)$$

$$= (43.267)\dot{m}_{a1} + (18.1)\dot{m}_5$$

冷却使湿空气温度降至 69°F, 此时空气的含湿量是

$$\omega_5 = \omega_1 = 0.00831 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}/\text{lb}_m \text{ da} \quad \text{和} \quad \dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a5}$$

因此对 3-6 混合(参见题 9.96), 有

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{36} = \dot{m}_{a3}(h_{a3} + \omega_3 h_{a3}) + \dot{m}_6 h_6 = \dot{m}_{a1}[14.415 + (0.00831)(1087.4)] + \dot{m}_6(28.1) \\ = (23.451)\dot{m}_{a1} + (28.1)\dot{m}_6 \end{aligned}$$

令 \dot{Q}_{15} 等于 \dot{Q}_{36} (绝热冷却), 可得线性关系

$$(19.816)\dot{m}_{a1} = (28.1)\dot{m}_6 - (18.1)\dot{m}_5 \quad (1)$$

由水的质量守恒, 可得第二个线性关系式(参见下面一段)

$$(0.01249)\dot{m}_{a1} = \dot{m}_6 - \dot{m}_5 \quad (2)$$

因 \dot{m}_5 已知, 同时求解式(1), (2), 可得 $\dot{m}_{a1} = 29.968 \text{ lb}_m/\text{min}$, 由此得

$$\dot{m}_4 = (1 + \omega_4)\dot{m}_{a4} = (1 + \omega_4)\dot{m}_{a1} = (1 + 0.00831)(29.968) = 30.217 \text{ lb}_m/\text{min}$$

为计算 \dot{m}_4 对应的体积流量, 需知混合物的分子量, 它是

$$M_4 = 30.217 / [(0.251/18.02) + (29.966/28.97)] = 28.824 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole}$$

则有理想气体方程给出

$$\dot{V}_4 = \dot{m}_4 R_a T_4 / M_4 P_4 = (30.217)(1545)(545) / (28.824)(14.7 \times 144) = 415.6 \text{ ft}^3/\text{min}$$

9.100 题 9.99 中, 60°F 的冷空气被加热至 72°F, 需要多少热(Btu/min)?

$$\begin{aligned} \text{解} \quad \dot{Q}_2 = \dot{m} \Delta h = \dot{m}_a [(h_{a2} - h_{a3}) + \omega_1 (h_{g2} - h_{g3})] \\ = (29.968) [(17.299 - 14.415) + (0.00831)(1092.6 - 1087.4)] = 87.72 \text{ Btu/min} \end{aligned}$$

呼吸

9.101 将人的呼吸过程隔开单独考虑, 由于在吸气和呼气阶段气体的性质、组分和流动速率的不同, 将会造成身体内质量的损耗. 假定人吸入空气的平均速率为 0.5 kg/h, 而身体内的氮含量保持不变, 则混合物的性质如表 9-5 所示, 分析这一流动过程(在一长周期内取平均). 计算质量损耗的平均值(以每天多少 kg 为单位). 为此目的, 身体被看成为一个控制体, 其中热和功的传递被忽略.

解 在 20°C, 水的饱和蒸汽压是 $P_{s1} = 0.02198 \text{ bar}$, 因此, 水蒸气的分压为 $P_{v1} = \phi_1 P_{s1} = (0.30)(0.02198) = 0.00659 \text{ bar}$. 含湿量是 $\omega_1 = (0.622)P_{v1} / (P - P_{v1}) = 0.00407 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg da}$.

表 9-5

		吸入空气	呼出废气
温度		20°C	38°C
压强		1.01325 bar	1.01325 bar
干空气 的摩尔 分数	x_{N_2}	0.79	0.78
	x_{O_2}	0.21	0.17
	x_{CO_2}	0.00	0.05
相对湿度		30%	100%

将干空气的体积百分比转换成质量百分比[质量百分比公式为 $\mu_i = x_i M_i / M_{\text{mix}}$, 式中 $M_{\text{mix}} = \sum x_i M_i$], 对吸入空气可求得

$$M_{\text{mix}} = 28.84, \quad \mu_{N_2} = 0.767, \quad \mu_{O_2} = 0.233, \quad \mu_{H_2O} = 0.000$$

因此, 对 1 kg 湿空气,

$$N_2 = 0.767/1.00407 = 0.764 \text{ kg}, \quad O_2 = 0.233/1.00407 = 0.232 \text{ kg}$$

$$H_2O = 0.00407/1.00407 = 0.004 \text{ kg}$$

同样, 对于呼出气体, 有

$$M_{\text{mix}} = 29.48, \quad \mu_{N_2} = 0.741, \quad \mu_{O_2} = 0.185, \quad \mu_{CO_2} = 0.075$$

由于四舍五入, 现总质量分数为 1.001. 呼出气体为 38°C, 100% 的饱和气体, 所以 $P_{v2} = P_{s2} =$

0.06630bar , $\omega_2=0.04355\text{kgH}_2\text{O/kg}$, 则和 1.001kg 干空气混合后的呼出湿空气混合物为 $(1.001)(1+\omega_2)=1.04459\text{kg}$. 因此, 对 1.00000kg 呼出混合物而言,

$$\text{N}_2=0.741/1.04459=0.709\text{kg}, \quad \text{O}_2=0.185/1.04459=0.177\text{kg}$$

$$\text{CO}_2=0.075/1.04459=0.072\text{kg}, \quad \text{H}_2\text{O}=\omega_2(1+\omega_2)=0.042\text{kg}$$

在体内仅有的守恒元素是氮. 它是 0.764kg/kg (吸入混合物) 和 0.709kg/kg (呼出混合物). 吸气的速率是 0.5kg(混合物)/h , 因此吸入的氮是 $(0.764)(0.5)=0.382\text{kgN}_2/\text{h}$. 若呼出混合物的流率是 m_2 , 则 $(0.709)m_2=0.382$, 解得 $m_2=0.539\text{kg/h}$. 因此, 每小时呼出气体的质量比吸入的多 0.039kg , 故质量的损耗量是 $(0.039)(24)=0.94\text{kg/天}$.

第十章 制 冷

卡诺(Carnot)制冷机

对于讨论工作介质为 R12 和水的卡诺制冷机(逆向运行的卡诺热机)的题目,参见第六章.

布雷顿(Brayton)制冷机

10.1 介绍逆向布雷顿循环制冷机.

解 原则上任何作功的空气循环耗时都能用作制冷,(仅仅功是逆向的,而不是操作顺序也逆向),通常采用的逆向空气循环是布雷顿循环(题 7.119).图 10-1 表示这样一个逆向布雷顿循环的原理框图和 T-S 图.

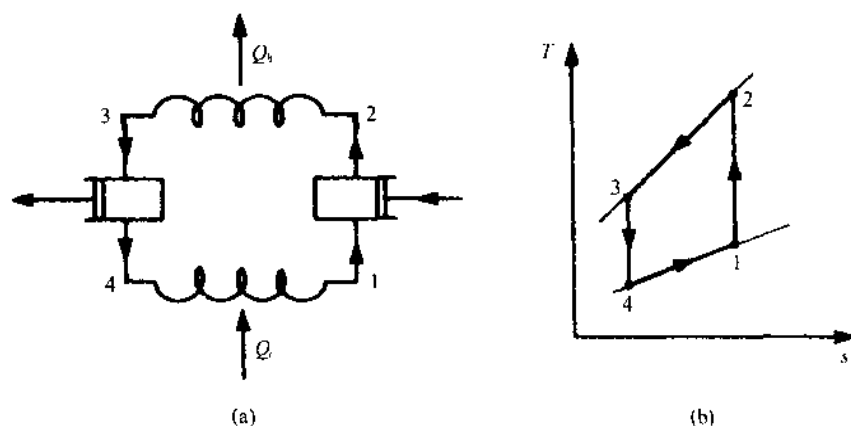


图 10-1

蒸汽制冷循环

10.2 描述基本蒸汽-压缩制冷循环.

解 如图 10-2, (i)过程 1→2,制冷剂从饱和蒸汽被压缩成过热气体,假定该过程为理想过程,在循环的这一阶段无熵增. (ii)过程 2→3,过热气体在盘管中被冷却,对一个简单循环而言,经过这一冷却过程产生饱和液体,如果在盘管中没有流动阻力,则该过程为一等压过程.图 10-2(c)中,单相区部分的等压线从右上角指向左下角. (iii)过程 3→4,饱和液体通过一个喷嘴膨胀到点 4 的低压状态.根据题 5.41,这一过程可认为是绝热的. (iv)过程 4→1,汽液混合物通过另一盘管,与此同时,从周围环境吸热,此为制冷阶段(过程 2→3 不制冷).

10.3 定义蒸汽压缩制冷的性能系数(COP). (注:性能系数(Coefficient of Performance)即制冷系数.)

解 题 6.53 给出的一般性定义可应用于此.根据图 10-2 的流程图,性能系数

$$(\text{COP}) = Q_c / w_{\text{net}} = (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1) = (h_1 - h_3) / (h_2 - h_1)$$

10.4^D 使用 R12 制冷剂的制冷机的蒸发温度为 250K,冷凝温度为 300K,假定压缩是完全有效的,计算: (a) 输入的功(kJ/kg R12); (b) 性能系数(COP).

解 (a) 由图 10-2(c),表 C2 给出 $h_1 = (250\text{K 下的 } h_g) = 541.5\text{kJ/kg}$; $s_1 = (250\text{K 下的 } s_g) = 4.570\text{kJ/kg} \cdot \text{K} = s_2$; 在状态 2,压强为 6.841bar,对应于 300K 的饱和液体温度.根据表 6 插值得到,在此压强下已给定的 s_2 值出现在 $T_g = 310\text{K}$. 因此

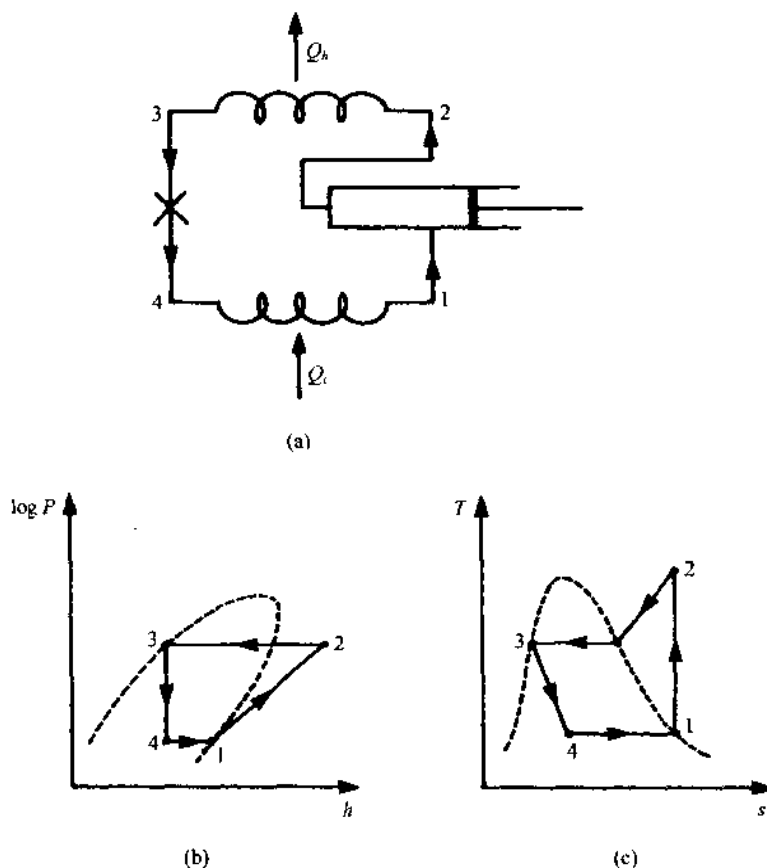


图 10-2

$$h_{2s} = 571.7 + (0.841/2)(568.6 - 571.7) = 570.4 \text{ kJ/kg}$$

等熵压缩的功是

$$w_c = h_2 - h_1 = 570.4 - 541.5 = 28.9 \text{ kJ/kg R12}$$

$$(b) \quad q_c = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 = h_1 - (300\text{K 时的 } h_f) = 541.5 - 426.0 = 115.5 \text{ kJ/kg}$$

所以性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_c} = \frac{115.5}{28.9} = 4.00$$

10.5° 使用 R12 作为流体工质的制冷机的冷冻室温度为 -10°F , 完全有效(无摩擦损失)的压缩使流体在 80°F 下冷凝. 求: (a) 所需的功(Btu/lb_m R12); (b) 此循环的性能系数.

解 (a) 利用图 10-2 的图示, 可从表 C1 得

h_1 (-10°F 下的 h_g) = 76.20 Btu/lb_m, s_1 (-10°F 下的熵 s_g) = 0.1699 Btu/lb_m · °R = s_2 在状态 2, 压强 P_2 为 98.87 psia, 所对应的饱和温度为 80°F , 为求取对应于 P_2 和 s_2 的温度 T_2 , 可在表 C1 和表 C5 中插值. 因为在 100 psia 下, 对应于熵 $s_g = 0.1639$ 的温度为 80.8°F , 对应于熵 $s = 0.1700$ 的温度为 100°F , 因此, 对应于熵 $s = 0.1699$ 的温度为

$$80.8 + \left(\frac{0.1699 - 0.1639}{0.1700 - 0.1639} \right) \left(\frac{100}{80.8} \right) = 99.7^\circ\text{F}$$

在 80 psia 下, 对应于熵 $s_g = 0.1645$ 的温度为 66.2°F , 对应于熵 $s_g = 0.1689$ 的温度为 80°F , 熵 $s = 0.1749$ 的温度为 100°F , 因此对应于熵 $s = 0.1699$ 的温度为

$$80.8 + \left(\frac{0.1699 - 0.1689}{0.1749 - 0.1689} \right) (20) = 83.3^\circ\text{F}$$

在 98.87 psia 下, 相同的熵值 s_2 将出现在

$$T_2 = 80 + \left(\frac{98.9 - 83.3}{99.7 - 83.3} \right) (20) = 99.0^\circ\text{F}$$

在 99°F 和 98.9 psia 下, $h_{2s} = 88.55 \text{ Btu/lb}_m$, 所以所做的功

$$w_c = h_2 - h_1 = 88.55 - 76.20 = 12.35 \text{ Btu/lb}_m \text{ R12}$$

$$(b) q_c = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 - h_1 - (80^\circ\text{F 下的 } h_f) = 76.20 - 26.37 = 49.83 \text{ Btu/lb}_m$$

因此,性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_c} = \frac{49.83}{12.35} = 4.04$$

10.6^D 假定压缩机效率为 95%,重解题 10.4.

解 当 $\eta_c = 0.95$, 可得

$$(a) \quad w_c = \frac{w_a}{\eta_c} = \frac{28.9}{0.95} = 30.4 \text{ kJ/kg R12}$$

(b) 性能系数

$$\text{COP}_a = \eta_c \cdot \text{COP}_s = (0.95)(4.0) = 3.80$$

10.7^D 假定压缩机的等熵效率是 90%,重解题 10.5:

解 当 $\eta_c = 0.90$, 可得

$$(a) \quad w_c = \frac{w_a}{\eta_c} = \frac{12.35}{0.90} = 13.72 \text{ Btu/lb}_m \text{ R12}$$

(b) 性能系数

$$\text{COP}_a = \eta_c \cdot \text{COP}_s = (0.90)(4.04) = 3.64$$

10.8^D 确定题 10.6 循环所能达到的最高温度(K).

解 对于题 10.4 的完全有效压缩,等熵压缩后达到的温度是 $T_{2s} = 310\text{K}$. 对于一个非完全有效压缩,由于压缩后实际的焓 h_{2a} 大于 h_{2s} ,压缩后达到一更高的温度 T_{2a} .

$$h_{2a} = h_{2s} + \left(\frac{1}{\eta_c} - 1\right)w_c = 570.4 + \left(\frac{1}{0.95} - 1\right)(28.9) = 571.9 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{而在 } 320\text{K 和 } 6.841\text{bar, } h = 578.6 + \frac{0.841}{2}(575.9 - 578.6) = 577.5 \text{ kJ/kg}$$

因此, $T_{2s} = 310 < T_{2a} < 320\text{K}$, 由线性插值得

$$T_{2a} = 310 + \left(\frac{571.9 - 570.4}{577.5 - 570.4}\right)(10) = 312\text{K}$$

10.9^D 确定题 10.7 的循环所能达到的最高温度.

解 对于题 10.5 的完全有效压缩,压缩后达到的温度是 99°F , 所对应的焓是 $h_{2s} = 88.55 \text{ Btu/lb}_m$. 对于非完全有效压缩,压缩至 98.87psia 后的焓为

$$h_{2a} = h_{2s} + \left(\frac{1}{\eta_c} - 1\right)w_c = 88.55 + \left(\frac{1}{0.90} - 1\right)(12.35) = 89.92 \text{ Btu/lb}_m$$

对应于此压强,此焓值的温度可用插值求得.

对应于 100°F , 98.87psia ,

$$h = 89.64 + \left(\frac{18.87}{20}\right)(88.69 - 89.64) = 88.74 \text{ (太低)}$$

对应于 120°F , 98.87psia ,

$$h = 92.95 + \left(\frac{18.87}{20}\right)(92.12 - 92.95) = 92.17 \text{ (太高)}$$

因此,

$$T_{2a} \approx 100 + \left[\frac{89.92 - 88.74}{92.17 - 88.74}\right](20) = 106.9^\circ\text{F}$$

10.10^D 采用 R12 的制冷机工作在 1.5bar 和 6bar 压强下. 假定为理想循环,计算:(a) 输入功(kJ/kgR12); (b) 性能系数.

解 (a) 给定的高压是冷凝压强,低压是蒸发压强,在理想循环中,其压缩过程无损失出现,可认为是等熵过程,(如图 10-2(c)). 由已知条件得

$$h_1 = (1.5\text{bar 下的 } h_g) = 542.9 \text{ kJ/kg, } s_1 = (1.5\text{bar 下的 } s_g) = 4.568 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

因此,压缩后压强升高到 $P_2 = 6\text{bar}$, 而 $s_2 = s_1 = 4.568 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 从压强为 6bar 的过热蒸汽表, $s_{300\text{K}} = 4.561$, $s_{310\text{K}} = 4.583$, 所以当 $s = 4.568$ 时,对应的温度

$$T_{2s} = 310 + \left(\frac{4.586 - 4.561}{4.583 - 4.561}\right)(10) = 310 + \left(\frac{0.007}{0.022}\right)(10) = 313.2\text{K}$$

在此条件下,

$$h_{2s} = 564.8 + \left(\frac{3.2}{10}\right)(571.7 - 564.8) = 567.0 \text{ kJ/kg}$$

因此,

$$w_{cs} = h_{2s} - h_1 = 567.0 - 542.9 = 24.1 \text{ kJ/kg R12}$$

$$(b) \quad q_c = h_1 - h_2 = h_1 - h_{2s} = 542.9 - 421.1 = 121.0 \text{ kJ/kg}$$

式中 h_2 是 6bar 下的 h_f . 因此, 性能系数

$$\text{COP}_s = \frac{q_c}{w_{cs}} = \frac{121.0}{24.1} = 5.02$$

10.11^D 采用 R12 的制冷机工作在 20psia 和 100psia 之间, 假定为理想循环, 计算: (a) 输入功 (Btu/lbm R12); (b) 性能系数.

解 (a) 当一个制冷循环被认为是理想的, 则假定其是等熵压缩. 该循环工作在蒸发压强(低压)和冷凝压强(高压)之间. 按照示意图 10-2

$$h_1 = 76.40 \text{ Btu/lbm} \quad s_1 = 0.1697 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R} = s_2$$

由表 C5 知, 所求熵值与 100psia, 100°F 下的熵值非常接近, 故可采用外推求取

$$T_{2s} \approx 100 + \left(\frac{0.1697 - 0.1700}{0.1760 - 0.1700}\right)(20) = 99^\circ\text{F}$$

因此,

$$h_{2s} \approx 88.69 - \frac{1}{20}(92.12 - 88.69) = 88.52 \text{ Btu/lbm}$$

$$w_{cs} = h_{2s} - h_1 = 88.52 - 76.40 = 12.12 \text{ Btu/lbm R12}$$

$$(b) \quad q_c = h_1 - h_2 = h_1 - h_{2s} = h_1 - (100\text{psia 下的 } h_f) = 76.40 - 26.54 = 49.86 \text{ Btu/lbm}$$

性能系数

$$\text{COP}_s = \frac{q_c}{w_{cs}} = \frac{49.86}{12.12} = 4.11$$

10.12^D 如果测得题 10.10 中制冷机的性能系数是 $\text{COP}_a = 4.75$, 则压缩过程的等熵效率是多少?

解

$$\eta = \frac{\text{COP}_a}{\text{COP}_s} = \frac{4.75}{5.02} = 94.6\%$$

10.13^D 如果测得题 10.11 中制冷机的性能系数是 $\text{COP}_a = 4.00$, 则压缩过程的等熵效率是多少?

解

$$\eta = \frac{\text{COP}_a}{\text{COP}_s} = \frac{4.00}{4.11} = 97.3\%$$

10.14^D 对题 10.10 制冷循环的每一过程作出能量平衡.

解 对一个制冷过程, 单位质量工质在忽略动能、势能转换情况下的稳定流动方程为 $q + w = \Delta h$. 过程 1→2 为等熵过程, $q_s = 0$. 过程 2→3 为放热过程, 在此过程没有冷却效应, 只有过程 4→1 才从外界吸热具有冷却效应. 还需注意节流过程 3→4 没有传热, 没有做功和焓的变化, 由此可构成表 10-1.

表 10-1

过程	$q/(\text{kJ/kg})$	$w/(\text{kJ/kg})$	$\Delta h/(\text{kJ/kg})$
1→2	0.0	24.1	24.1
2→3	-145.9	0.0	-145.9
3→4	0.0	0.0	0.0
4→1	121.8	0.0	121.8
\oint	-24.1	24.1	0.0

10.15^D 对题 10.11 中循环的每一过程作出能量平衡.

解 按照题 10.14 的解题方法可构筑表 10-2。

表 10-2

过程	$q/(\text{Btu/lb}_m)$	$w/(\text{Btu/lb}_m)$	$\Delta h/(\text{Btu/lb}_m)$
1→2	0.00	12.12	12.12
2→3	-61.98	0.0	-61.98
3→4	0.00	0.0	0.00
4→1	49.86	0.0	49.86
\oint	-12.12	12.12	0.00

10.16^D 如果题 10.4 制冷循环中膨胀机和压缩机都是完全有效的, 则性能系数有哪些提高?

解 此循环现被示于图 10-3, 图中等熵膨胀过程 3→5 代替了图 10-2 中的等焓节流膨胀过程 3→4。由题 10.4 有
 $h_1 = 541.5 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 570.4 \text{ kJ/kg}$, $h_3 = 426.0 \text{ kJ/kg}$
 现在所应用的条件是 $s_5 = s_3 = (300\text{K 时的 } s_f) = 4.090 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$,
 因此在状态 5, 干度必须满足

$$\begin{aligned} 4.090 &= (1-x_5)s_6 + x_5s_1 \\ &= (1-x_5)(250\text{K 时的 } s_f) + x_5(250\text{K 时的 } s_g) \\ &= (1-x_5)(3.918) + x_5(4.570) \end{aligned}$$

所以 $x_5 = 0.264$ 。在此干度下, 焓为

$$h_5 = (1-x_5)h_6 + x_5h_1 = (1-0.2638)(378.5) + (0.2638)(541.5) = 421.5 \text{ kJ/kg}$$

由此给出新的冷却效应

$$q_c = h_1 - h_5 = 541.5 - 421.5 = 120.0 \text{ kJ/kg}$$

如果将膨胀功输出, $h_3 - h_5 = 426.0 - 421.5 = 4.5 \text{ kJ/kg}$ 以抵消部分压缩功, 则净功

$$w_{\text{net}} = (h_2 - h_1) - (h_3 - h_5) = 28.9 - 4.5 = 24.4 \text{ kJ/kg}$$

所以, 性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{120.0}{24.4} = 4.92$$

即增加了 23% (与等焓节流相比)。

10.17^D 题 10.5 中 R12 的循环用一个完全有效的膨胀机取代节流装置, 其性能系数将变为多少?

解 此循环如图 10-3 所示, 图中用等熵膨胀过程 3→5 代替图 10-2 中的等焓节流过程 3→4。由题 10.5,

$$h_1 = 76.20 \text{ Btu/lb}_m, \quad h_2 = 88.55 \text{ Btu/lb}_m, \quad h_3 = 26.37 \text{ Btu/lb}_m$$

在 80°F, 饱和液体的熵

$$s_f = 0.0548 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R} = s_3 = s_5 = (1-x_5)s_6 + x_5s_1$$

式中 s_6 为 -10°F 下的 s_f , 而 s_1 为 -10°F 下的 s_g 。因此,

$$0.0548 = (1-x_5)(0.0146) + x_5(0.1699) \quad \text{即} \quad x_5 = 0.2589$$

在此干度下,

$$h_5 = (1-0.2589)(6.37) + (0.2589)(76.20) = 24.45 \text{ Btu/lb}_m$$

循环净功

$$\begin{aligned} w_{\text{net}} &= {}_1w_2 + {}_3w_5 = (h_2 - h_1) + (h_5 - h_3) = (88.55 - 76.20) + (24.45 - 26.37) \\ &= 10.43 \text{ Btu/lb}_m \end{aligned}$$

冷却效应为

$$q_c = h_1 - h_5 = 76.20 - 24.45 = 51.75 \text{ Btu/lb}_m$$

因此, 性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{51.75}{10.43} = 4.96$$

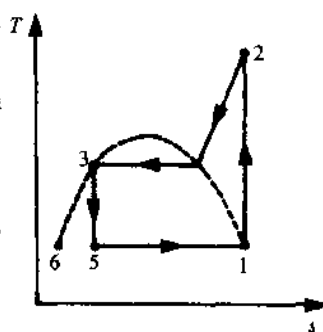


图 10-3

即增加了 22.8%。

- 10.18^D 对于题 10.16 的制冷循环,高、低温的极限温度是 250K 和 300K(见题 10.4),工作在此温度下的卡诺制冷机的性能系数将是多少?

解 对实际制冷机,题 10.16 给出性能系数 $COP=4.92$,而对于卡诺制冷机,

$$COP^* = \frac{T_c}{T_h - T_c} = \frac{250}{300 - 250} = \frac{250}{50} = 5.0 > 4.92$$

这一结果和题 6.53 一致,即在一给定温差下卡诺制冷机的性能系数最大。

- 10.19^D 参考题 10.5 和 10.17,在 -10°F 和 80°F 之间运行的卡诺制冷机的性能系数是多少?

解 对实际制冷机, $COP=4.96$,对卡诺制冷机:

$$COP^* = \frac{T_c}{T_h - T_c} = \frac{450^\circ\text{R}}{90^\circ\text{R}} = 5 > 4.96$$

这一不等号反映了这样一个事实:卡诺循环制冷机比任何一个在相同温差下工作的制冷机更有效,具有更高的性能系数。

- 10.20^D 比较图 10-4 所示 R12 的循环 12341 和 56345 的性能系数。假定 $P_1=P_4=P_5=1.5\text{bar}$, $P_2=P_3=P_6=16\text{bar}$, $h_3=h_4$ 。

解 循环 12341 已在题 10.10 中分析过,所求得的性能系数是 5.02。

对循环 56345, $s_3=s_6=(6\text{bar 时的 } s_g)=4.549\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, 状态 5 的干度可从下式求得:

$$4.549 = (1-x_5)s_7 + x_5s_1 = (1-x_5)(3.929) + x_5(4.568)$$

解得 $x_5=0.9703$, 因此,

$$h_5 = (1-0.9703)(381.2) + (0.9703)(542.9) = 538.1\text{kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = w_{\text{in}} = h_6 - h_5 = 561.5 - 538.1 = 23.4\text{kJ/kg}$$

$$q_c = h_5 - h_4 = h_5 - h_3 = 538.1 - 421.1 = 117.0\text{kJ/kg}$$

性能系数

$$COP = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{117.0}{23.4} = 5.00$$

- 10.21^D 假定 $P_1=P_4=P_5=20\text{psia}$, $P_2=P_3=P_6=100\text{psia}$, 且 $h_3=h_4$, 重解题 10.20。

解 循环 12341 已在题 10.11 中分析过,所求得的性能系数是 4.11。

对循环 56345, $s_3=s_6=(100\text{psia 时的 } s_g)=0.1623\text{Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{R}$, 状态 5 的干度可从下式求得:

$$0.1632 = (1-x_5)s_7 + x_5s_1 = (1-x_5)(0.0285) + x_5(0.1672)$$

解得 $x_5=0.9712$, 在此条件下,

$$h_5 = (1-0.9712)(12.86) + (0.9712)(79.39) = 77.47\text{Btu/lb}_m$$

$$w_{\text{net}} = w_{\text{in}} = h_6 - h_5 = 87.03 - 77.47 = 9.56\text{Btu/lb}_m$$

$$q_c = h_5 - h_4 = h_5 - h_3 = 77.47 - 31.10 = 46.37\text{Btu/lb}_m$$

性能系数

$$COP = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{46.37}{9.56} = 4.85$$

- 10.22^D 比较图 10-5 所示 R12 的循环 12341 和 56345 的性能系数,假定 $P_1=P_4=P_5=1.5\text{bar}$, $P_2=P_3=P_6=6\text{bar}$, $s_3=s_4$ 。

解 对循环 12341,由题 10.10 可知, $h_1=542.9\text{kJ/kg}$, $h_2=567.0\text{kJ/kg}$, $w_2=h_2-h_1=24.1\text{kJ/kg}$, 因此 $s_4=s_3=(6\text{bar 时的 } s_f)=4.073\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, 状态 4 的干度可从下式求得:

$$4.073 = (1-x_4)s_7 + x_4s_1 = (1-x_4)(3.929) + x_4(4.568)$$

解得 $x_4=0.2254$, 因此,

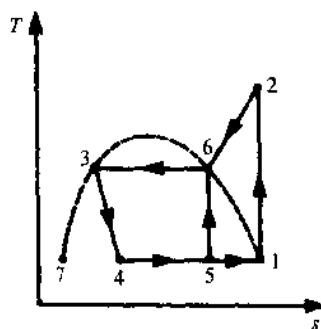


图 10-4

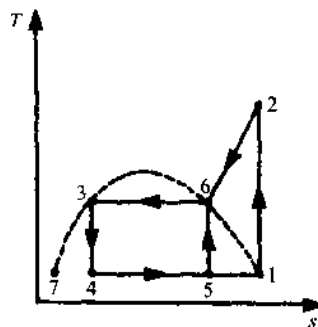


图 10-5

$$\begin{aligned}
 h_4 &= (1 - 0.2254)(381.2) + (0.2254)(542.9) = 417.7 \text{ kJ/kg} \\
 {}_3w_4 &= h_4 - h_3 = 417.7 - 421.1 = -3.4 \text{ kJ/kg} \\
 w_{\text{net}} &= {}_1w_2 + {}_3w_4 = 24.1 - 3.4 = 20.7 \text{ kJ/kg} \\
 q_c &= h_1 - h_4 = 542.9 - 417.7 = 125.2 \text{ kJ/kg}
 \end{aligned}$$

性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{125.2}{20.7} = 6.05$$

对循环 56345, 由题 10.12 知, $h_5 = 538.1 \text{ kJ/kg}$, $h_6 = 561.5 \text{ kJ/kg}$, 所以 ${}_5w_6 = h_6 - h_5 = 561.5 - 538.1 = 23.4 \text{ kJ/kg}$ 和循环 12341 一样, ${}_3w_4 = -3.4 \text{ kJ/kg}$; 因此,

$$w_{\text{net}} = {}_5w_6 + {}_3w_4 = 20.0 \text{ kJ/kg}$$

因为

$$q_c = h_5 - h_4 = 538.1 - 417.7 = 120.4 \text{ kJ/kg}$$

性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{120.4}{20.0} = 6.02$$

10.23^D 假定 $P_1 = P_4 = P_5 = 20 \text{ psia}$ 和 $P_2 = P_3 = P_6 = 100 \text{ psia}$, 且 $s_3 = s_4$, 重解题 10.22.

解 对循环 12341, 由题 10.11 知,

$$h_1 = 76.40 \text{ Btu/lb}_m, \quad h_2 = 88.52 \text{ Btu/lb}_m, \quad h_3 = 26.54 \text{ Btu/lb}_m$$

在状态 4,

$$s_4 = (100 \text{ psia 时的 } s_f) = 0.0555 = (1 - x_4)(0.0155) + x_4(0.1697)$$

解得 $x_4 = 0.2594$. 在该点, 焓值

$$h_4 = (1 - 0.2594)(6.56) + (0.2594)(76.40) = 24.68 \text{ Btu/lb}_m$$

因此, 性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)} = \frac{76.40 - 24.68}{88.52 - 76.40 + 24.68 - 26.54} = 5.04$$

对循环 56345,

$$s_5 = s_6 = (100 \text{ psia 时的 } s_g) = 0.1639 \text{ Btu/lb}_m \cdot {}^\circ\text{R} = (1 - x_5)(0.0205) + x_5(0.1687)$$

解得 $x_5 = 0.9676$. 因此,

$$h_5 = (1 - 0.9676)(6.56) + (0.9676)(76.40) = 74.13 \text{ Btu/lb}_m$$

另一方面, $h_6 = (100 \text{ psia 时的 } h_g) = 85.35 \text{ Btu/lb}_m$. 所以性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{h_5 - h_4}{(h_6 - h_5) + (h_4 - h_3)} = \frac{74.13 - 24.68}{85.35 - 74.13 + 24.68 - 26.54} = 5.28$$

10.24^D 采用 R12 的制冷循环工作在 1.5 bar 和 6 bar 之间. 经压缩后, (工质) 最高温度达到 325 K, 计算: (a) 输入的功 (kJ/kg); (b) 性能系数; (c) 压缩机的等熵效率 (%).

解 题 10.10 是一个具有完全有效压缩的理想循环, 根据图 10-2 所示系统,

$$h_1 = 542.9 \text{ kJ/kg}, \quad h_2 = 567.0 \text{ kJ/kg}, \quad w_{12} = h_2 - h_1 = 24.1 \text{ kJ/kg}$$

(a) 在 6 bar 和 325 K, 表 C6 给出 $h_{2a} = 578.6 + (5/10)(585.4 - 578.6) = 582.0 \text{ kJ/kg}$. 因此,

$$w_{12a} = h_{2a} - h_1 = 582.0 - 542.9 = 39.1 \text{ kJ/kg}$$

(b) 性能系数 (COP) = q_c/w_{net} . 这里, $q_c = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 = 542.9 - 421.1 = 121.0 \text{ kJ/kg}$; $w_{\text{net}} = w_{12}$, 因此, 性能系数

$$\text{COP} = \frac{121.0}{39.1} = 3.09$$

$$(c) \quad \eta = \frac{w_{12}}{w_{12a}} = \frac{24.1}{39.1} = 61.6\%$$

10.25^D 采用 R12 的制冷循环工作在 20 psia 和 100 psia 之间. 经压缩后, (工质) 最高温度达 120°F, 计算: (a) 输入的功 (Btu/lb_m); (b) 性能系数; (c) 压缩机的等熵效率 (%).

解 在题 10.11 的理想循环中, 对图 10-2 所示系统,

$$h_1 = 76.40 \text{ Btu/lb}_m, \quad h_2 = 88.52 \text{ Btu/lb}_m, \quad w_{12} = h_2 - h_1 = 12.12 \text{ Btu/lb}_m$$

(a) 在 100 psia 和 120°F, 表 C5 给出 $h_{2a} = 92.12 \text{ Btu/lb}_m$, 因此,

$$w_{2s} = h_{2s} - h_1 = 92.12 - 76.40 = 15.72 \text{ Btu/lb}_m$$

(b) 由题 10.11, $q_c = 49.86 \text{ Btu/lb}_m$, 因此, 性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{49.86}{15.72} = 3.17$$

$$(c) \quad \eta = \frac{w_{2s}}{w_{2s}} = \frac{12.12}{15.72} = 77.1\%$$

10.26^D 已经研制出采用 R12 的两级冷凝的 PURFRIG 制冷机, 假定蒸发压强是 1bar, 低压冷凝器的工作压强是 5bar, 高压冷凝器的工作压强是 10bar, 用一个阀门控制进入高压段的 R12 的比例, 使得两股流体的制冷效应相等, (a) 流量比 $\dot{m}_{\text{HP}}/\dot{m}_{\text{LP}}$ 是多少? (b) 该循环性能系数是多少?

解 (a) 按照图 10-6 所示系统, 对相等的制冷量, 有

$$\dot{m}_{\text{HP}}(h_1 - h_6) = \dot{m}_{\text{LP}}(h_1 - h_3)$$

即

$$\frac{\dot{m}_{\text{HP}}}{\dot{m}_{\text{LP}}} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_6} = \frac{538.2 - 414.8}{538.2 - 440.8} = \frac{1.27}{1}$$

(b) 因为, 性能系数

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_{\text{net}}} = \frac{2\dot{m}_{\text{LP}}(h_1 - h_3)}{\dot{m}_{\text{HP}}(h_3 - h_1) + \dot{m}_{\text{LP}}(h_2 - h_1)} = \frac{2(h_1 - h_3)}{1.27(h_3 - h_1) + (h_2 - h_1)}$$

剩下的问题归结为确定 h_2 和 h_3 , 现在 $s_3 = s_2 = s_1 = (1\text{bar 下的 } s_g) = 4.576 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 由表 C6 在 5bar 下插值得 $T_2 \approx 300 - (1/23)(10) = 299.6 \text{ K}$, 在此温度下, $h_2 \approx 566.4 - (1/23)(6.8) = 566.1 \text{ kJ/kg}$, 同样, 在 10bar 下, 可求得 $h_3 \approx 579.0 \text{ kJ/kg}$.

因此, 性能系数

$$\text{COP} = \frac{2(538.2 - 414.8)}{(1.27)(579.0 - 538.2) + (566.1 - 538.2)} = 3.10$$

10.27^D 为了适应国内市场(指美国, 译者注), 有必要将 PURFREG 制冷机(题 10.26)在 USCD 单位下重新计算, 假定压强现在分别为 15psia, 75psia 和 150psia.

$$\text{解 (a)} \quad \frac{\dot{m}_{\text{HP}}}{\dot{m}_{\text{LP}}} = \frac{h_1 - h_3}{h_1 - h_6} = \frac{75.03 - 22.19}{75.03 - 33.40} = \frac{1.27}{1}$$

(b) 由于流量比仍是 1.27/1, 性能系数 COP 仍可按题 10.26 的公式计算, 而式中的 h_2 和 h_3 则可按条件 $s_3 = s_2 = s_1 = (15\text{psia 下的 } s_g) = 0.1711 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{R}$ 计算. 由表 C5 在 75psia 下插值得

$$T_2 \approx 80 + \frac{0.1711 - 0.1704}{0.1764 - 0.1704}(20) = 82.3^\circ \text{F}$$

再进行一次插值, 可得 $h_2 \approx 86.95 \text{ Btu/lb}_m$.

与此相似, 在 150psia, $h_3 \approx 92.61 \text{ Btu/lb}_m$, 因此, 性能系数

$$\text{COP} = \frac{2(75.03 - 22.19)}{1.27(92.61 - 75.03) + (86.95 - 75.03)} = 3.09$$

10.28 与题 10.26 相对应的是提出一个具有双级蒸发的 HIFRIG 制冷机(图 10-7). 该制冷机采用 R12 作工质, 将其压缩至 10bar, 然后通过一个阀门, 将流体的 x 分量膨胀至 5bar 并通过一个蒸发器蒸发, 剩下的 $(1-x)$ 分量膨胀至 1bar, 并通过第二个蒸发器蒸发. 试给出: (a) w_{net} ; (b) q_c ; (c) 循环的性能系数 COP 作为 x 的函数的表达式.

解 和通常一样所求量可从焓导出. 我们有 $h_1 = (1\text{bar 下的 } h_g) = 538.2 \text{ kJ/kg}$, 对于等熵压缩 $1 \rightarrow 2$, $s_2 = s_1 = (1\text{bar 下$

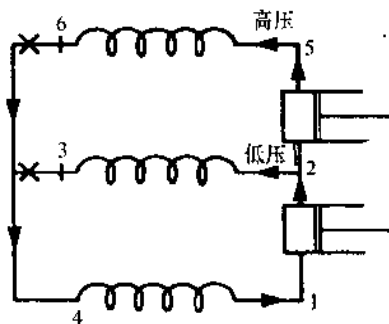


图 10-6

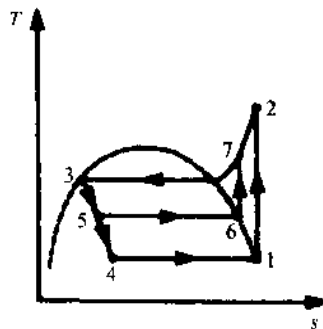


图 10-7

的 $s_g = 4.576 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 它对应了 $h_2 = 579.0 \text{ kJ/kg}$.

同样, h_6 (5 bar 下的 h_g) = 558.8 kJ/kg. 对等熵压缩 6→7, $s_7 = s_6 =$ (5 bar 下的 s_g) = 4.551 kJ/kg · K, 所对应的温度 T_7 , 可以通过表 C6 中在 10 bar 下的值插值得到

$$T_7 \approx 314.9 + \left(\frac{4.551 - 4.544}{4.557 - 4.544} \right) (320 - 314.9) = 317.6$$

在此条件下,

$$h_7 = 569.0 + \left(\frac{2.7}{5.1} \right) (3.8) = 571.0 \text{ kJ/kg}$$

最后,

$$h_3 = (10 \text{ bar 下的 } h_f) = 440.8 \text{ kJ/kg}$$

$$(a) \quad w_{\text{net}} = (1-x)(w_2) + x(w_7) = (1-x)(h_2 - h_1) + x(h_7 - h_6) = 40.8 - 28.6x \text{ kJ/kg}$$

$$(b) \quad q_c = (1-x)(h_1 - h_4) + x(h_6 - h_5) = (1-x)(h_1 - h_3) + x(h_6 - h_3) \\ = (1-x)(97.4) + x(118.0) = (97.4 + 20.6x) \text{ kJ/kg}$$

(c) 性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_c}{w_{\text{net}}} = \frac{97.4 + 20.6x}{40.8 - 28.6x}$$

- 10.29 在题 10.28 的 HIFRIG 制冷机中, 当液体的 x 分量取何值时, 可使两个蒸发器中带走的热量相等?

解 由题 10.28(b), 两股流体的冷却效应(带走的热量)分别为 $97.4(1-x)$ 和 $118.0x$, 使两者相等, 解得 $x = 0.452$.

- 10.30 在题 10.28 的 HIFRIG 制冷机中, 当流体的 x 分量取何值时, 可使它的冷却效应 q_c 与在题 10.26 PURFRIG 制冷机中的冷却效应相等?

解 对 PURFRIG 制冷机,

$$q_c = \frac{2\dot{m}_{\text{R12}}(h_1 - h_3)}{\dot{m}_{\text{HFR}} + \dot{m}_{\text{R12}}} = \frac{2(h_1 - h_3)}{2.27} = \frac{246.8}{2.27} = 108.8 \text{ kJ/kg R12}$$

因此(参见题 10.28(b)), $108.8 = 97.4 + 20.6x$, 即 $x = 0.558$.

- 10.31 在 HIFRIG 制冷机(题 10.28)和 PURFRIG 制冷机(题 10.26)中, 当冷却效应相等时, 所输入的功的比值是多少?

解 利用题 10.30 的结果:

$$\frac{w_{\text{HFR}}}{w_{\text{PFR}}} = \frac{\text{COP}_{\text{PFR}}}{\text{COP}_{\text{HFR}}} = \frac{3.10}{[97.4 + (20.6)(0.558)]/[40.8 - (28.6)(0.558)]} = 0.71$$

- 10.32 题 10.31 指出 HIFRIG 制冷机要优于 PURFRIG 制冷机, 请说明该结论对所有高于某一特定临界值的 x 都正确.

解 从题 10.28(c) 可见, 性能系数 COP_{HFR} 稳定地从 $x=0$ 时的 $97.4/40.8 \approx 2$ 开始增长, 直到 $x=1$ 时的 $118.0/12.2 \approx 10$, 因此, 以好的机器将有更高的 COP 作为判别标准, 则所确定的临界值可由方程 $\text{COP}_{\text{HFR}}(x) = 3.0$ 的单一根求得.

- 10.33^D 在题 10.4 中, 分析了一个工作在 250K 和 300K 之间的理想制冷循环, 该循环包含了一个在 1.336 bar 的蒸发压强和 6.841 bar 的冷凝压强之间的单一等熵压缩. 如果像布雷顿循环那样(题 7.143)将其变为具有中间冷却的两段压缩, 能降低所需的输入功吗?

解 按题 7.143, 可选择 $[(1.336)(6.841)]^{1/2} \approx 3.0 \text{ bar}$ 作为中间压强(将其冷却到 250K). 因此, $s_2 = s_1 = 4.570 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 和 $P_2 = 3 \text{ bar}$. 现在 3 bar 下, $s_g = 4.557 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ (从表 C4 得), 在 3 bar 和 280K, 表 C6 给出 $s = 4.575 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 因此, 在第一次压缩后温度达到 277.9K, 焓达到 555.2 kJ/kg, 第一阶段的压缩功约为 13.7 kJ/kg.

R12 现在 3 bar 下被冷却至 250K. 而在 250K 下饱和气体压强为 1.336 bar, 即 R12 将成压缩液体, 这将使第二压缩阶段无法进行.

- 10.34^D 题 10.11 分析了一个工作在 20 psia 和 100 psia 之间的理想制冷循环, 它包含了一个单一的等熵压缩, 如果将其变为像布雷顿循环那样(题 7.143)的具有中间冷却的两

段压缩,能降低所需的输入功吗?

解 即使 R12 不是一种理想气体,题 7.143 所进行的过程也几乎是优化的,即在等熵下将 R12 从在 20psia 下的饱和蒸汽压缩到 $[(20)(100)]^{1/2} = 44.7\text{psia}$,冷却使其返回初温 (-8.10°F),然后在等熵下压缩到 100psia.然而,在第一次压缩后的 44.7psia 压强下,其饱和温度将是 31.70°F .如果将 R12 蒸汽在 44.7psia 下冷却至低于 31.7°F 的 -8.10°F ,将出现冷凝,第二次压缩将对液体压缩,这对一个简单的制冷机而言是不能实现的.

10.35^D 题 10.33 表明在制冷循环中采用中间冷却使工质返回初始温度的做法是不可取的.是否可采用部分冷却并使功耗明显下降?

解 图 10-8 显示循环 12341 工作在 250K 和 300K 之间,经过第一次压缩至状态 5,压强为 3bar,而中间冷却(可进行到出现饱和液体的状态 6)必须在饱和蒸汽状态 7 停下.在状态 1, $s_1 = 4.750\text{kJ/kg} \cdot \text{K} = s_5$ (此时压强为 3bar).因此,如题 10.33, $T_5 = 277.9\text{K}$ 和 $h_5 = 555.2\text{kJ/kg}$.

R12 可在 3bar 下被冷却至 $T_7 = 272.3\text{K}$, $h_7 = 551.6\text{kJ/kg}$ 和 $s_7 = 4.557\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$.第二次压缩将其压至状态 8,此时, $P_8 = 6.841\text{bar}$, $s_8 = s_7 = 4.557\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$.在 300K, $s = 4.557\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$,对表中数据采用外推法得压强为

$$6 + \left(\frac{4.557 - 4.561}{4.561 - 4.577} \right) (1) = 6.25\text{bar}$$

同样,在 310K, $s = 4.557\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$,可得压强为

$$6 + \left(\frac{4.557 - 4.583}{4.556 - 4.583} \right) (2) = 7.93\text{bar}$$

因此,

$$P_8 = 6.841\text{bar}, \quad T_8 = 300 + \left(\frac{6.84 - 6.25}{7.93 - 6.25} \right) (10) = 309.8\text{K}$$

在此温度和压强下,焓非常接近于 568.6kJ/kg .因此,两次压缩做的总等熵功为 $(555.2 - 541.5) + (568.6 - 551.6) = 30.7\text{kJ/kg}$.而单一压缩过程所需的功仅为 28.9kJ/kg (题 10.4(a)).可见,将 3bar 作为中间压强并无益处.

10.36^D 题 10.34 表明在 20psia 和 100psia 之间的 R12 循环采用中间冷却是不实际的,请对仅仅冷却到临界冷凝点的情况作分析.

解 参照图 10-8 (温度标尺需重新确定).在 $P_1 = 20\text{psia}$ 下的 R12 被等熵压缩至 $P_5 = [(20)(100)]^{1/2} = 44.72\text{psia}$.然后冷却到饱和蒸汽状态 7,接着进一步将工质等熵压缩至 $P_8 = 100\text{psia}$.在状态 1,

$$h_1 = 76.40\text{Btu/lb}_m, \quad s_1 = 0.1697\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

在 40°F 和 44.72psia,

$$s = 0.1711 + (4.72/10)(0.1666 - 0.1711) = 0.1690\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

在 60°F 和 44.72psia,

$$s = 0.1771 + (4.72/10)(0.1727 - 0.1771) = 0.1750\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

与熵 $s_s = 0.1697\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 对应的温度为

$$T_5 = 40 + [(0.1697 - 0.1690)/(0.1750 - 0.1690)](20) = 42.33^\circ\text{R}$$

在此条件下,

$$h_5 = 82.16 + (0.233)(84.96 - 82.16) = 82.81\text{Btu/lb}_m$$

所以,第一次压缩所需的功为 $82.81 - 76.40 = 6.41\text{Btu/lb}_m$.

在 44.72psia,饱和蒸汽的焓是 80.59Btu/lb_m ,熵是 $0.1664\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.因为在 100psia 下, 80.8°F 时的熵是 $0.1639\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$, 100°F 时的熵是 $0.1700\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$.所以等熵压缩至 100psia 后的温度由内插得:

$$T_8 = 80.8 + [(0.1664 - 0.1639)/(0.1700 - 0.1639)](100 - 80.8) = 88.7^\circ\text{F}$$

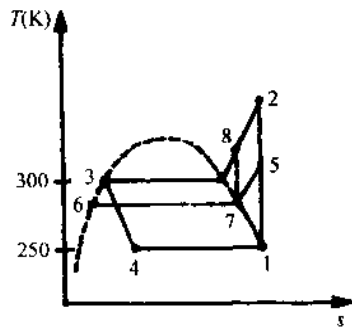


图 10-8

在此压强和温度下,

$$h_8 = 85.35 + (88.7 - 80.8)(88.69 - 85.35)/(100 - 80.8) = 86.72 \text{ Btu/lb}_m$$

因此,第二次压缩所需的功是 $86.72 - 80.59 = 6.13 \text{ Btu/lb}_m$.

二次压缩的总功是 $6.41 + 6.13 = 12.54 \text{ Btu/lb}_m$. 这就超过了题 10.11 计算的一次压缩所做的功 12.12 Btu/lb_m . 所以,二级压缩没有任何优越性.

空气液化

10.37 简要描述产生液态空气的林德-哈普森(Linde-Hampson)循环. 指出当所提供的设备是绝热时,所生产的液态空气的量仅由室温下的压缩程度决定.

解 循环的原理图和 $T-s$ 图如图 10-9 所示. 从状态 1 开始,低压、室温下的空气被压缩至高压,压缩产生的热在冷却器 C 中被去除,故在状态 2,高压空气又回到其起始温度. 然后,高压空气通过换热器 E,被冷却至状态 3. 从状态 3 到状态 4,它被节流膨胀至低压. 如果状态 4 的温度足够低,一部分空气就被液化. 其平衡物(未被液化部分)成为在状态 5 的冷蒸汽,逆向通过同一个换热器 E,和流入的高压空气流交换能量,最后,又返回初始状态 1.

将换热器单独选作一个热力学系统,假定两股空气流(与外界)之间的传热完全被隔绝,因此, $H_2 - H_3 = H_1 - H_5$, 而 $H_3 = H_4$, 所以, $H_2 - H_3 = H_5 - H_4 = H_1 - H_2$. 循环的冷却能力被定义为 $Q_c = H_5 - H_3$, 注意,对循环而言, Q_c 与 Q_r 不同. 事实上,上述公式表示 Q_c 数值上与 $H_1 - H_2 = Q_r$ 相等. 由此得出结论:冷却能力取决于由压缩引起的焓降,而与节流膨胀的温度值无关.

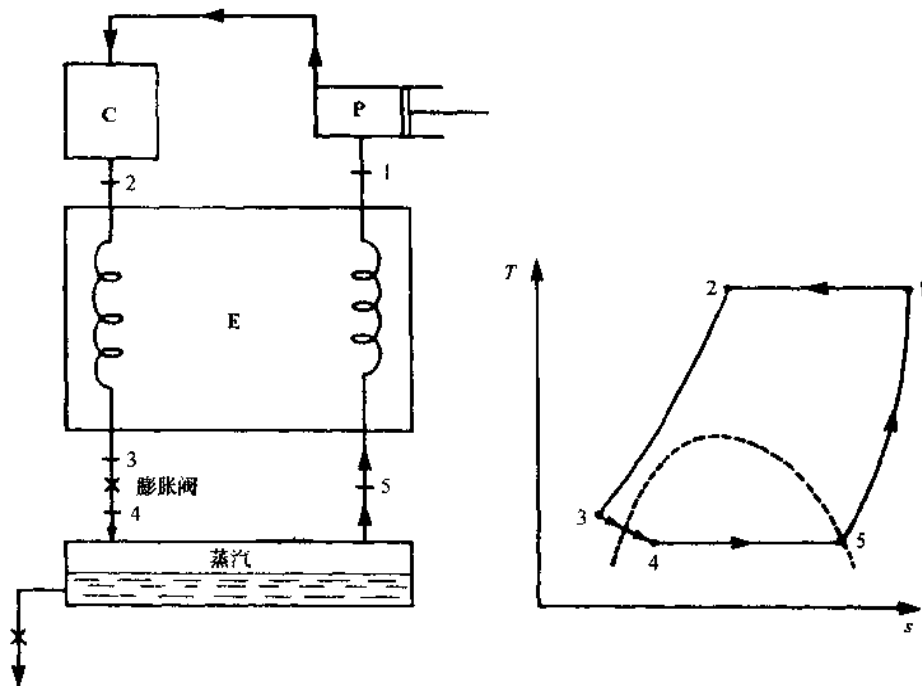


图 10-9

10.38 定义环境温度下,用压缩参数表示的林德-哈普森循环的性能系数.

解 林德-哈普森循环感兴趣的不是怎样冷却黄油和鸡蛋,而是怎样冷却工作空气. 因此,定义一个新的性能系数 $\text{COP} = Q_c / W_{\text{net}}$, 由题 10.37, $Q_c = m(h_1 - h_2)$, $W_{\text{net}} = (\text{等温压缩功}) = mRT_1 \ln(P_2/P_1)$ (对半完全气体而言).

因此,性能系数

$$\text{COP} = \frac{h_1 - h_2}{RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1}}$$

10.39^D 计算工作压强在 1bar 和 20bar 之间的林德-哈普森循环的性能系数,假定液态空气在 78.6K 下生成,而压缩在 300K 下完成. 所需要的数据可从以下 300K 空气的焓值

表得到.

P/bar	1	50	100	150	200	250	300	400	500	1000
$h/(\text{kJ/kg})$	300.3	289.7	279.9	271.8	265.5	260.8	257.7	254.8	255.4	279.5

解 利用题 10.38 的公式

$$h_1 - h_2 = 300.3 - 296.0 = 4.3 \text{ kJ/kg}$$

$$RT_1 \ln(P_2/P_1) = (0.287)(300) \ln(20/1) = 257.9 \text{ kJ/kg}$$

性能系数

$$\text{COP} = \frac{4.3}{257.9} = 0.0167$$

- 10.40^D 计算工作压强在 15psia 和 1500psia 之间的林德-哈普森循环的性能系数,假定液态空气在 141.5°R 下生成而压缩在 80°F 下完成,所需要的数据可从以下 80°F 下空气的焓值表中得到.

P/psia	15	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	8000
$h/(\text{Btu/lb}_m)$	129.1	126.0	122.9	120.1	117.7	115.6	113.9	111.5	110.0	113.3

解 利用题 10.38 的公式,

$$h_1 - h_2 = 129.1 - 120.1 = 9.0 \text{ Btu/lb}_m$$

$$RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1} = 0.0685 \times 540 \ln \frac{1500}{15} = 170.35 \text{ Btu/lb}_m$$

性能系数

$$\text{COP} = \frac{9}{170.35} = 0.0528$$

- 10.41^D (a) 参考图 10.9,推导林德-哈普森循环中,液态空气的产率(kg 液空/kg 空气)作为状态焓值函数的表达式.(b) 假定产率刚好是 5%,液态空气的焓是 -124.1 kJ/kg.需将 300K 下的空气压缩至多少 bar?

解 (a) 对一个(与外界)绝热的换热器,1kg 从状态 2 到状态 3 的流体将产生 y kg 液态空气,而通过换热器从状态 5 返回到状态 1 的空气流是 $(1-y)$ kg. 因此,将 $m\Delta h$ 作为传热量,有 $1(h_2 - h_3) = (1-y)(h_1 - h_5)$,故 $h_3 = h_2 - (1-y)(h_1 - h_5)$. 在状态 4 流入冷凝器的流体的焓值为 h_4 ,它必须同流出的净焓值相等: $h_4 = yh_6 + (1-y)h_5$. 令 h_3 和 h_4 相等(节流过程 3→4 是等焓的),解出 $y = (h_1 - h_2)/(h_1 - h_6)$. 注意,如果将饱和液体的焓(h_6)取作零,则 $y = 1 - (h_2/h_1)$.

(b) 由所导出的公式,

$$h_2 = h_1 + (h_6 - h_1)y = 300.3 + (-124.9 - 300.3)(0.05) = 279.0 \text{ kJ/kg}$$

在题 10.39 表中插值得 $P_2 \approx 106 \text{ bar}$.

- 10.42^D 在林德-哈普森循环中,要将 80°F 的空气中的 10% 转化成液态空气,则要将其压缩至多少 psia? 假定液态空气的焓为 0.0 Btu/lb_m.

解 由题 10.41(a), $h_2 = (1-y)h_1 = (0.9)(129.1) = 116.2 \text{ Btu/lb}_m$. 在题 10.40 表中插值,此焓值将出现在

$$P_2 \approx 2000 + \left[\frac{116.2 - 117.7}{115.6 - 117.7} \right] (500) = 2375 \text{ psia}$$

重叠循环

- 10.43^D 图 10-10 表示一个空气-蒸汽双级发电厂,通过此电厂各状态点的参数,由表 10.3 给出. 燃气轮机和蒸汽轮机的等熵效率均为 90%,空气压缩机和给水泵的效率为 85%,对一个完全绝热的电厂,计算它的发电效率.

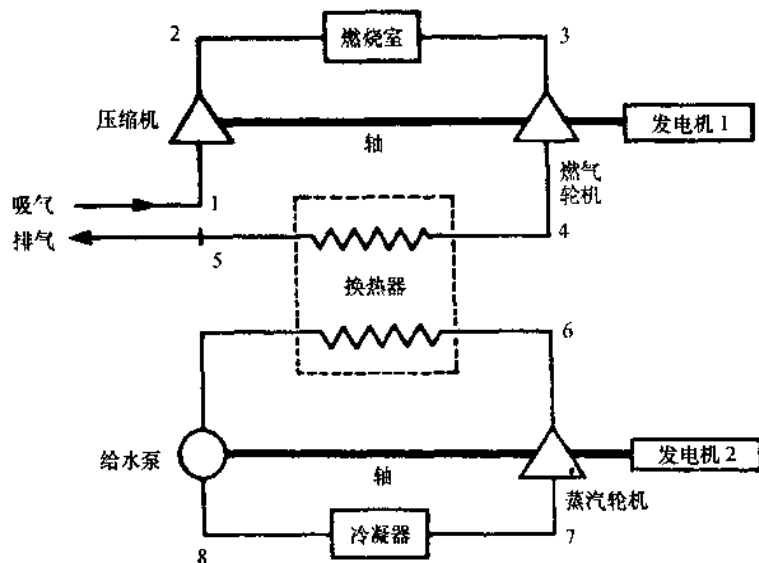


图 10-10

表 10-3

状态点	P/bar	T/K	状态点	P/bar	T/K
1	1	300	5	1	500
2s	10		6	10	750
2a	10		7	0.03531	300
3	10	1400	8	0.03531	300
4s	1		9s	10	
4a	1		9a	10	

解 我们必须从决定其热力学性质的状态开始分析空气和蒸汽两个循环。

对蒸汽循环,在状态 6, $h_6 = 3428 \text{ kJ/kg}$, $s_6 = 7.697 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$,对在蒸汽轮机中的等熵膨胀 $s_7 = s_6$,在状态 7 的压强和温度表明此为饱和状态,验算得在 300 K , $s_g = 8.52 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$,因此等熵膨胀将导致湿介质产生,在状态 7s 的干度可从下式求得:

$$7.697 = (1 - x_{7s})(0.393) + x_{7s}(8.520)$$

由此解得

$$x_{7s} = 0.8987 \quad \text{而} \quad h_{7s} = (1 - 0.8987)(112.5) + (0.8987)(2550) = 2303 \text{ kJ/kg}$$

因此,等熵膨胀的功为

$$h_6 - h_{7s} - w_{es} = 3428 - 2303 = 1125 \text{ kJ/kg}$$

而实际膨胀的功为

$$w_a = \eta_e w_{es} = (0.90)(1125) = 1013 \text{ kJ/kg}$$

在状态 7 的实际的焓是

$$h_{7a} = h_6 - w_a = 3428 - 1013 = 2415 \text{ kJ/kg}$$

该值仍小于饱和蒸汽的焓 (2550 kJ/kg)。在状态 8,假定进入给水泵的水处在饱和液体状态,即 $h_8 = 112.5 \text{ kJ/kg}$,压缩功近似为

$$w_{cs} \approx v_f \Delta P = (1.003 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})[(1000 - 3.531) \text{ kPa}] = 1.0 \text{ kJ/kg}$$

由于此泵的绝热效率是 0.85,压缩过程实际耗功为

$$w_{ca} = w_{cs} / \eta_p = 1.0 / 0.85 = 1.2 \text{ kJ/kg}$$

蒸汽循环产生的净功为 $w_a - w_{ca} = 1013 - 1.2 \approx 1012 \text{ kJ/kg}$ 蒸汽。在蒸汽循环中输入的能量为

$$q_{in} = h_6 - h_9 = h_6 - (h_8 + w_{ca}) = 3428 - (112.5 + 1.2) = 3314 \text{ kJ/kg 蒸汽}$$

对空气循环,在 1bar 和 300 K ,表 B2 给出 $h_1 = 300.2 \text{ kJ/kg}$ 和 $P_{r1} = 2.451$,等熵压缩至 10bar,

$$P_{r_2} = P_{r_1} (P_2/P_1) = (2.451)(10) = 24.51$$

而

$$T_{2s} = 550 + [(24.51 - 20.99)/(28.81 - 20.99)](50) = 572.5\text{K}$$

在此温度下,

$$h_{2s} = 551 + (22.5/50)(52.3) = 578.6\text{kJ/kg}$$

因此,等熵压缩的功是

$$w_{1s} = h_{2s} - h_1 = 578.6 - 300.2 = 278.4\text{kJ/kg}$$

而实际压缩耗功

$$w_{1a} = w_{1s}/\eta = 278.4/0.85 = 327.6\text{kJ/kg}$$

燃气轮机输出的功也可用相似的方法确定. 在状态 3,

$$h_3 = 1517\text{kJ/kg}, P_{r_3} = 795.6$$

经过等熵膨胀,

$$P_{r_4} = P_{r_3} (P_4/P_3) = (795.6)(1/10) = 79.56$$

给出

$$T_{4s} = 750 + [(79.56 - 66.11)/(84.51 - 66.11)](50) = 786.5\text{K}$$

在此温度下,

$$h_{4s} = 767.8 + (16.5/50)(54.7) = 785.9\text{kJ/kg}$$

绝热膨胀的功是

$$w_{3s} = h_3 - h_{4s} = 1517 - 785.9 = 731\text{kJ/kg}$$

实际膨胀的功是

$$w_{3a} = \eta w_{3s} = (0.90)(731) = 658\text{kJ/kg}$$

因此,空气循环中输出的净功是

$$w_{\text{net}} = w_{3a} - w_{1a} = 658 - 328 = 330\text{kJ/kg}$$

空气留给蒸汽循环的热量是

$$q_a = h_4 - h_5 = (h_3 - w_{3a}) - h_5 = (1517 - 658) - 503 = 356\text{kJ/kg 空气}$$

由于整个发电厂与外界绝热,空气失去的热量应等于蒸汽得到的热量: $\dot{m}_a q_a = \dot{m}_s q_h$, 即

$$\frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_a} = \frac{q_h}{q_a} = \frac{3314}{356} = 9.309 \frac{\text{kg 空气}}{\text{kg 蒸汽}}$$

发电厂的热力学效率是

$$\eta = \sum w_{\text{net}}/q_h$$

式中 $q_h = (\text{输给空气的热}) = h_3 - h_2 = h_3 - (h_1 + w_{1a}) = 1517 - (300 + 328) = 889\text{kJ/kg}$. 每公斤蒸汽的功为 1012kJ/kg 蒸汽 , 折合成每公斤空气的功是

$$(1012\text{kJ/kg 蒸汽})/(9.309\text{kg 空气/kg 蒸汽}) = 108.7\text{kJ/kg 空气}$$

因此,效率

$$\eta = \frac{330 + 108.7}{889} = 49.4\%$$

- 10.44^b 图 10-10 表示一空气-蒸汽双级发电厂. 通过此电厂各状态点的参数示于表 10-4. 燃气轮机和蒸汽轮机的效率均为 90%, 空气压缩机和给水泵的效率均为 85%, 对一个完全绝热的电厂, 计算其发电效率.

表 10-4

状态点	P/psia	T/°F	状态点	P/psia	T/°F
1	15	80	5	15	500
2s	150		6	300	850
2a	150		7	1	100
3	150	1840	8	1	100
4s	15		9s	300	
4a	15		9a	300	

解 对空气循环, 等熵压缩过程 1→2,

$$P_{r_2} = P_{r_1} (P_2/P_1) = (2.442)(150/15) = 24.42$$

因此,

$$T_{2s} = 1000 + [(24.42 - 21.71)/(30.44 - 21.71)](100) = 1031.6^\circ\text{R}$$

在此温度下,

$$h_{2s} = 241.1 + (31/100)(266.2 - 241.1) = 248.9 \text{ Btu/lb}_m$$

因此等熵压缩的功是

$$w_{1s} = h_{2s} - h_1 = 248.9 - 129.1 = 119.8 \text{ Btu/lb}_m$$

而实际压缩的功是

$$w_{1a} = w_{1s}/\eta_c = 119.8/0.85 = 140.9 \text{ Btu/lb}_m$$

燃烧后,经过等熵膨胀过程 $3 \rightarrow 4$,

$$P_{r4} = P_{r3}(P_4/P_3) = 545.1(15/150) = 54.51$$

所以

$$T_4 = 1200 + [(54.51 - 41.95)/(56.80 - 41.95)](100) = 1285.6^\circ\text{R}$$

在此温度下,

$$h_4 = 291.6 + (85.6/100)(371.2 - 291.6) = 313.5 \text{ Btu/lb}_m$$

因此,等熵膨胀的功是

$$w_{2s} = h_3 - h_4 = 589.0 - 313.5 = 275.5 \text{ Btu/lb}_m$$

而实际膨胀的功是

$$w_{2a} = \eta_e w_{2s} = (0.90)(275.5) = 248.0 \text{ Btu/lb}_m$$

因此,燃气轮机循环回路的净功是

$$w_{\text{net}} = w_{2a} - w_{1a} = 248.0 - 140.9 = 107.1 \text{ Btu/lb}_m$$

吸入的热量是

$$q_h = h_3 - h_{2s} = 589.0 - 270.0 = 319.0 \text{ Btu/lb}_m$$

式中

$$h_{2s} = h_1 + w_{1a} = 129.1 + 140.9 = 270 \text{ Btu/lb}_m$$

对蒸汽循环,由于水在状态 7 和 8 的参数是 1 psia 和 100°F ,所以状态 8 的物理状态必须是稍被压缩的液体,取饱和液体的性质作为一级近似,

$$h_8 \approx 68.0 \text{ Btu/lb}_m$$

$$h_{9s} = h_8 + w_{1s} = h_8 + v_8(P_7 - P_8)$$

$$= 68.0 + (0.01613)(300 - 1)(144/778) = 68.0 + 0.893 = 68.9 \text{ Btu/lb}_m$$

式中采用了 USCS 单位下的一般转换因子。因此, $w_{1s} = 0.893 \text{ Btu/lb}_m$, 实际的压缩功是 $w_{1a} = w_{1s}/\eta_c = 0.893/0.85 = 1.1 \text{ Btu/lb}_m$, 所以,状态 9 的实际焓值为

$$h_{9a} = h_8 + w_{1a} = 68.0 + 1.1 = 69.1 \text{ Btu/lb}_m$$

对蒸汽轮机,表 A3 给出

$$h_6 = 1448 \text{ Btu/lb}_m \quad s_6 = 1.739 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

对等熵膨胀过程,在 $P_7 = 1 \text{ psia}$, $s_7 = s_6 = 1.739 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$,在此条件下,将出现湿蒸汽,其干度需满足

$$1.739 = (1 - x_{7s})(0.133) + x_{7s}(1.978)$$

因此, $x_{7s} = 0.870$,等熵焓为

$$h_{7s} = (1 - 0.870)(69.7) + (0.870)(1106) = 971.8 \text{ Btu/lb}_m$$

所以,等熵蒸汽轮机的输出功为

$$w_{3s} = h_6 - h_{7s} = 1448 - 971.8 = 476 \text{ Btu/lb}_m$$

实际输出功为

$$w_{3a} = \eta_e w_{3s} = (0.90)(476) = 428 \text{ Btu/lb}_m$$

蒸汽循环的输出净功为

$$w_{\text{net}} = w_{3a} - w_{1a} = 428 - 1.1 = 427 \text{ Btu/lb}_m$$

有关蒸汽循环的另两个因素需引起注意。首先,由于 $h_{1a} = h_6 - w_{3a} = 1448 - 428 = 1020 \text{ Btu/lb}_m$ 小于 1 psia 时饱和蒸汽的焓值 h_g ,进入冷凝器的蒸汽是干度较大的湿蒸汽。第二,从空气循环吸入的热量是 $h_6 - h_{9a} = 1448 - 69 = 1379 \text{ Btu/lb}_m$ 蒸汽。空气循环排出热量 $h_4 - h_3$ 到蒸汽循环。现对空气, h_3 是 589.0 Btu/lb_m , w_{2a} 是 248.0 Btu/lb_m , 因此, $h_{3a} = h_3 - w_{2a} = 589.0 - 248.0 = 341.0 \text{ Btu/lb}_m$, 在状态 5, 温度是 475°R , 表 B1 给出 $h_5 = 113.6 \text{ Btu/lb}_m$, 因此, 空气排出给蒸汽的热量是 $341.0 - 113.6 =$

227.4 Btu/lb_m. 由于整个电厂绝热, 空气失去的热量全被蒸汽得到, 故有

$$227.4 \dot{m}_a = 1379 \dot{m}_s$$

即:

$$\dot{m}_a / \dot{m}_s = 1379 / 227.4 = 6.064 \text{ lb}_m \text{ 空气 / lb}_m \text{ 蒸汽}$$

整个电厂的热力学效率是:

$$\eta = \frac{\sum w_{net}}{q_h} = \frac{107.1 \text{ Btu/lb}_m \text{ 空气} + 427.1 \text{ Btu/lb}_m \text{ 蒸汽}}{319.0 \text{ Btu/lb}_m \text{ 空气}}$$

而

$$427.1 \text{ Btu/lb}_m \text{ 蒸汽} = \frac{427.1 \text{ Btu/lb}_m \text{ 蒸汽}}{6.064 \text{ lb}_m \text{ 空气 / lb}_m \text{ 蒸汽}} = 70.4 \text{ Btu/lb}_m \text{ 空气}$$

所以

$$\eta = \frac{107.1 + 70.4}{319.0} = 55.6\%$$

- 10.45 将汞用作顶层循环介质, 甲醇用作底层循环介质的理想兰金型循环应用于一个双级重叠循环系统, 这些流体介质的热力学参数示于表 10-5. 所有在 650°C 下从汞循环排出的热量将全部被在 500°C 下的甲醇循环利用, (a) 汞循环的热力学效率是多少? (b) 甲醇循环的热力学效率是多少? (c) 对于每公斤汞将需要多少公斤甲醇?

表 10-5

工质	T/K	P/bar	$v_f / (\text{m}^3/\text{kg})$	$v_g / (\text{m}^3/\text{kg})$	$h_f / (\text{kJ/kg})$	$h_g / (\text{kJ/kg})$	$s_f / (\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$	$s_g / (\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$
Hg	650	1.443	7.881×10^{-5}	0.1805	94.51	388.67	0.4850	0.9370
	1000	65.740	8.482×10^{-5}	0.0059	144.41	419.00	0.5456	0.8199
MeOH	350	1.608	1.361×10^{-3}	0.5256	736.9	1812.4	4.415	7.488
	500	65.170	2.214×10^{-3}	0.0084	1353.7	1704.3	5.816	6.516

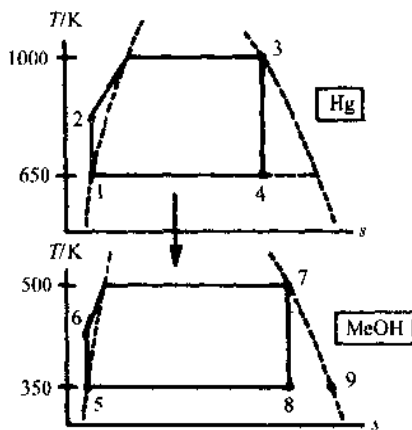


图 10-11

解 (a) 按图 10-11, 对顶层(汞)循环, $q_h = h_3 - h_2 = h_3 - (h_1 + w_2) = h_3 - h_1 - v_1(P_2 - P_1) = 419.00 - 94.51 - (7.881 \times 10^{-5})(6574 - 144.3) = 323.98 \text{ kJ/kg}$. 因为 $s_4 = s_3 = 0.8199 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 状态 4 的干度由下式给出:

$$x_4 = (0.8199 - 0.4850) / (0.9370 - 0.4850) = 0.7409$$

因此,

$$h_4 = (1 - 0.7409)(94.51) + (0.7409)(388.67) = 287.97 \text{ kJ/kg}$$

所以,

$$q_c = h_4 - h_1 = 287.97 - 70.02 = 217.95 \text{ kJ/kg}$$

则

$$\eta_{th} = 1 - q_c / q_h = 1 - (217.95 / 323.98) = 0.3273 = 32.7\%$$

(b) 对甲醇, 按图 10-11, 泵所作的功是

$$w_b = v_b(P_b - P_1) = (1.361 \times 10^{-3})(6517 - 160.8) = 8.65 \text{ kJ/kg}$$

因此,

$$q_b = h_7 - (h_5 + w_b) = 1704.3 - 736.9 - 8.7 = 958.7 \text{ kJ/kg}$$

对甲醇膨胀机, $s_8 = s_7 = 6.516 = (1 - x_8)(4.415) + x_8(7.488)$,

因此,

$$x_8 = 0.6837$$

而

$$q_c = h_8 - h_5 = [(1 - x_8)h_5 + x_8h_8] - h_5 = x_8(h_8 - h_5) = 735.3 \text{ kJ/kg}$$

则

$$\eta_{\text{MeOH}} = 1 - (q_c/q_b) = 1 - (735.3/958.7) = 0.2330 = 23.3\%$$

(c)

$$\frac{m_{\text{MeOH}}}{m_{\text{H}_2}} = \frac{q_{c,\text{H}_2}}{q_{b,\text{MeOH}}} = \frac{217.95}{958.7} = 0.2273$$

10.46 题 10.45 所述系统的总的热力学效率是多少?

解 由定义

$$\eta = 1 - \frac{Q_{c,\text{MeOH}}}{Q_{b,\text{H}_2}} = 1 - \left(\frac{m_{\text{MeOH}}}{m_{\text{H}_2}} \right) \left(\frac{q_{c,\text{MeOH}}}{q_{b,\text{H}_2}} \right) = 1 - 0.2273 \left(\frac{735.3}{323.98} \right) = 48.4\%$$

10.47 利用题 6.98 验算题 10.46 的计算结果.

解

$$1 - \eta = (1 - \eta_{\text{H}_2})(1 - \eta_{\text{MeOH}}) = (1 - 0.3273)(1 - 0.2330) = 0.5160$$

即

$$\eta = 0.4840$$

10.48 工作在理想兰金循环的甲醇, 其蒸发压强为 10bar, 冷凝压强为 1bar, 从冷凝器输出的热量用作 R12 的热源. R12 也工作在理想兰金循环, 其蒸发压强和冷凝压强与甲醇相同. 此重叠循环系统的热力学效率是多少?

解 按照重叠循环效率公式 $1 - \eta = (1 - \eta_{\text{MeOH}})(1 - \eta_{\text{R12}})$, 故只需求出单个循环的效率就可以了, 而此取决于八个状态的焓值. 首先考虑 MeOH 循环, 根据图 10-12, 我们有

$$h_5 = 703.4 \text{ kJ/kg}$$

$$h_6 = h_5 + v_b(P_b - P_1) = 703.4 + (1.337 \times 10^{-3})(1000 - 100) = 704.6 \text{ kJ/kg}$$

因为

$$s_8 = s_7 = (10\text{bar 下的 } s_g) = 7.118 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = (1 - x_8)(4.318) + x_8(7.580)$$

故干度为

$$x_8 = 0.8584 \quad h_8 = (1 - 0.8584)(703.4) + (0.8584)(1804.8) = 1648.8 \text{ kJ/kg}$$

另一方面,

$$h_7 = (10\text{bar 下的 } h_g) = 1832.8 \text{ kJ/kg}$$

对 R12 循环,

$$h_1 = 372.1 \text{ kJ/kg}$$

$$h_2 = h_1 + v_f(P_2 - P_1) = 372.1 + (6.719 \times 10^{-4})(1000 - 100) = 372.7 \text{ kJ/kg}$$

由于

$$s_4 = s_3 = (10\text{bar 下的 } s_g) = 4.544 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = (1 - x_4)(3.893) + x_4(4.576)$$

解得 $x_4 = 0.9531$, 则

$$h_4 = (1 - 0.9531)(372.1) + (0.9531)(538.2) = 530.4 \text{ kJ/kg}$$

另一方面,

$$h_3 = (10\text{bar 下的 } h_g) = 569.0 \text{ kJ/kg}$$

现在可以写出

$$1 - \eta = (1 - \eta_{\text{MeOH}})(1 - \eta_{\text{R12}}) = \frac{h_8 - h_5}{h_7 - h_6} \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} = \frac{1648.8 - 703.4}{1832.8 - 704.6} \frac{530.4 - 372.1}{569.0 - 372.7} = 0.6758$$

即

$$\eta = 0.3242 = 32.4\%$$

10.49 在图 10-13 所示系统中, 蒸汽动力部分的输出功率为 728 kJ/kg 蒸汽, 用此去驱动一个工作压强在 1bar 和 10bar 之间的 R12 制冷循环. 假定在 R12 循环中压缩机的效率

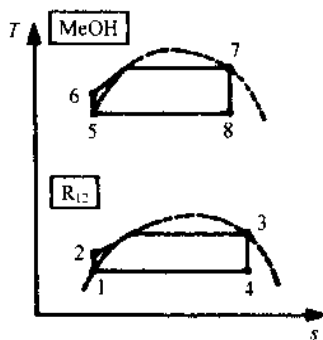


图 10-12

是 100%，求总的制冷效应(kJ/kg 蒸汽)。

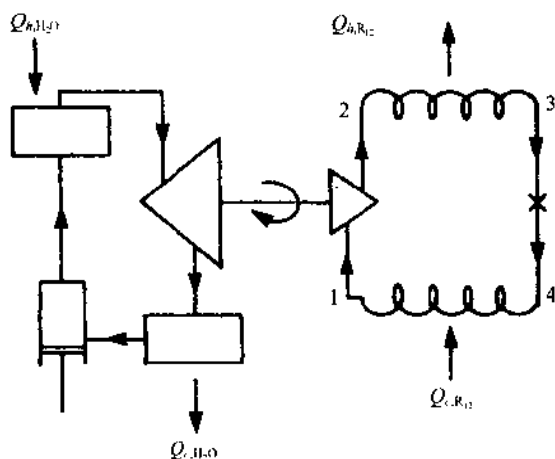


图 10-13

解 对 R12,

$$h_1 = (1\text{bar 下的 } h_g) = 538.2\text{kJ/kg}, \quad s_1 = (1\text{bar 下的 } s_g) = 4.576\text{kJ/kg} \cdot \text{K} = s_2$$

因此,从表 C6,

$$T_2 = 320 + [(4.576 - 4.557)/(4.580 - 4.557)](10) = 328.3\text{K}$$

在此温度下,

$$h_{2s} = 572.8 + (8.3/10)(580.3 - 572.8) = 579.0\text{kJ/kg}.$$

进一步, $h_3 = (10\text{bar 下的 } h_f) = 440.8\text{kJ/kg}$, 因此 R12 的制冷效应为

$$q_c = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 = 538.2 - 440.8 = 97.4\text{kJ/kg R12}$$

现将驱动 R12 循环所需的功 $(m_{\text{R12}}(h_{2s} - h_1) = 40.8m_{\text{R12}})$ 与给定的输入功 $(728m_{\text{蒸汽}})$ 相等, 可得

$$m_{\text{R12}}/m_{\text{蒸汽}} = 728/40.8 = 17.84\text{kg R12/kg 蒸汽}$$

所以,总的制冷效应为

$$(97.4\text{kJ/kg R12})(17.84\text{R12/kg 蒸汽}) = 1738\text{kJ/kg 蒸汽}$$

第十一章 燃烧：第一定律和方程平衡

本章习题中,如不作特殊说明,都假定化学反应在标准大气压下进行。

燃烧方程

- 11.1 (a) 解释在燃烧计算中有关空气的近似公式 $a\text{O}_2 + 3.76a\text{N}_2$; (b) 空气相应的质量百分构成是什么?

解 (a) 空气成分的精确分析已由题 2.195 给出。对粗略的燃烧计算,空气被假定为是由 21% 体积百分数的氧和 79% 体积百分数的氮构成的二元混合物,即在相同的压强和温度下,为 21% 摩尔百分比的氧和 79% 摩尔百分比的氮。因此,上述近似公式代表包含 a 摩尔(或体积,或分子)氧和 $(79\%/21\%)a = 3.76a$ 摩尔(或体积或分子)氮的一种简单空气。

(b) 摩尔分数 x_i (0.21 和 0.79) 和质量分数 μ_i 之间的关系是 $\mu_i = x_i M_i / \sum x_i M_i$ (参见题 2.197), 式中 M_i 是分子质量 (32 和 28), 和式 $\sum x_i M_i$ 表示混合物的实际分子总质量。

请记住只有在常温下的理想气体混合物,摩尔分数和体积分数才是一致的。

- 11.2 令 $F \equiv$ 燃料, $A \equiv$ 空气, 定义: (a) 等效当量比; (b) 贫瘠混合物; (c) 富裕混合物; (d) 建立等效当量比 ϕ 和部分过剩空气 ϵ 之间的关系。

解 (a) $\phi = (F/A)_{\text{实际质量}} / (F/A)_{\text{当量质量}} = (A/F)_{\text{当量质量}} / (A/F)_{\text{实际质量}}$, 式中质量指所用的质量。

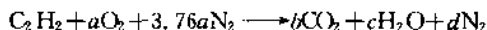
(b) 表示具有过剩空气, 氧气或其他氧化物 ($\phi < 1$)。

(c) 表示空气, 氧气或其他氧化物不充足 ($\phi > 1$)。

(d) $\phi = 1/(1+\epsilon)$ 。

- 11.3 建立乙炔 (C_2H_2) 在空气中燃烧的化学当量方程式。

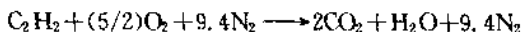
解 按照题 11.1(a) 给出的空气公式, 乙炔燃烧的当量方程式为



“化学当量”指的是恰好有足够的氧能完全氧化碳为碳的氧化物, 而在燃烧产物中没有一氧化碳和过剩的氧存在。对方程式两边的原子数配平, 得

$$\begin{array}{llll} \text{C:} & 2 = b & & \\ \text{H:} & 2 = 2c & \text{即 } c = 1 & \\ \text{O:} & 2a = 2b + c = 4 + 1 = 5 & \text{即 } a = 5/2 & \\ \text{N:} & (3.76)(2)a = 2d & \text{即 } d = 3.76a = 9.40 & \end{array}$$

因此



- 11.4 参照题 11.3, 如果乙炔在相应的化学当量的空气中燃烧, 其在摩尔百分比基础上的空气/燃料比将是多少?

解 平衡方程显示, 燃烧 1mol (摩尔) C_2H_2 , 需要 $5/2 = 2.5\text{mol O}_2$ 和 9.4mol N_2 , 总共 11.9mol 空气, 因此 $A/F = 11.9/1$ 。

- 11.5 参照题 11.3, 如果乙炔在相应的化学当量的空气中燃烧, 其在质量或重量分析基础上的空气/燃料比将是多少?

解 由题 11.4,

$$\frac{A}{F} = \frac{11.9\text{kmol 空气}}{1\text{kmol C}_2\text{H}_2} \cdot \frac{28.97\text{kg 空气/kmol 空气}}{26.02\text{kg C}_2\text{H}_2/\text{kmol C}_2\text{H}_2} = 13.25 \frac{\text{kg 空气}}{\text{kg C}_2\text{H}_2}$$

- 11.6^D 15m^3 空气和 1.00m^3 乙炔 (C_2H_2) 在相同的压强和温度下进入燃烧室, 两者均为理想气体, 确定对每公斤乙炔有多少公斤空气存在。

解 因为对理想气体而言体积比就是摩尔比,则

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{体积}} \cdot \frac{M_A}{M_F} = \frac{15}{1} \cdot \frac{28.97}{26.02} = \frac{16.70}{1}$$

- 11.7^D 500ft³ 空气和 30ft³ 乙炔(C₂H₂) 在相同的压强和温度下进入燃烧室,两者均为理想气体,确定对每磅乙炔有多少磅空气存在。

解 因为对理想气体而言,体积比就是摩尔比,则

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{体积}} \cdot \frac{M_A}{M_F} = \frac{500}{30} \cdot \frac{28.97}{26.02} = \frac{18.56}{1}$$

- 11.8^D 35m³ 空气 1m³ 丁烷(C₄H₁₀), 在相同的压强和温度下进入燃烧室,两者均为理想气体,确定对每公斤丁烷有多少空气存在。

解 利用表 D1

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{体积}} \cdot \frac{M_A}{M_F} = \frac{35}{1} \cdot \frac{28.966}{58.124} = \frac{17.44}{1}$$

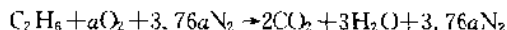
- 11.9^D 1000ft³ 空气和 30ft³ 丁烷(C₄H₁₀), 在相同的压强和温度下进入燃烧室,两者均为理想气体,确定对每磅丁烷有多少磅空气存在。

解 利用表 D1

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{体积}} \cdot \frac{M_A}{M_F} = \frac{1000}{30} \cdot \frac{28.966}{58.124} = \frac{16.61}{1}$$

- 11.10^D 乙烷(C₂H₆) 在刚好两倍的化学当量空气中燃烧,要氧化 6kg 燃料将要用掉多少公斤空气?

解 先列出反应的当量平衡方程式



式中通过氧的平衡得 $a = 7/2$, 然而, 由于所提供的空气的摩尔数是所需摩尔数的两倍, 故有

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} \cdot \frac{M_A}{M_F} = \frac{2(4.76)(7/2)}{1} \cdot \frac{28.966}{30.070} = 32.097$$

因此, $A = (32.097)F = (32.097)(6) = 193\text{kg}$ 空气。

- 11.11^D 乙烷在 100% 的过剩空气中燃烧, 要氧化 10 磅 (lb_m) 燃料将要用掉多少磅空气?

解 此题的分析与题 11.10 完全一样, 所以, 空气量 $A = (32.097)(10) = 320.97\text{lb}_m$ 空气。

- 11.12^D 求题 11.8 所示的化学反应的等效当量比。

解 化学当量方程是 $\text{C}_4\text{H}_{10} + a\text{O}_2 + 3.76a\text{N}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} + 3.76a\text{N}_2$

式中, 由氧的平衡得 $a = 13/2$, 因此,

$$(A/F)_{\text{当量质量}} = (A/F)_{\text{体积}} (M_A/M_F) = [(4.76)(13/2)/1](28.966/58.124) = 15.42$$

由题 11.8, $(A/F)_{\text{实际质量}} = 17.44$, 所以,

$$\phi = 15.42/17.44 = 0.8842$$

- 11.13^D 求题 11.9 所示的化学反应的等效当量比。

解 由题 11.12, $(A/F)_{\text{当量质量}} = 15.42$, 由题 11.9, $(A/F)_{\text{实际质量}} = 16.61$, 因此,

$$\phi = 15.42/16.61 = 0.9284$$

- 11.14^D 利用题 11.2(d) 的公式验算题 11.12 的结果。

解 以体积分析为基础, 得

$$\epsilon = \frac{\text{实际体积} - \text{当量体积}}{\text{当量体积}} = \frac{35 - 30.94}{30.94} = 0.1312$$

因此,

$$\phi = 1/(1 + 0.1312) = 0.8840$$

- 11.15^D 利用题 11.2 的(d) 的公式验算题 11.13 的结果。

解 以质量分析为基础, 得

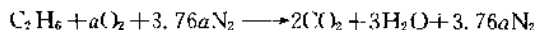
$$\epsilon = \frac{\text{实际质量} - \text{当量质量}}{\text{当量质量}} = \frac{16.61 - 15.42}{15.42} = 0.0772$$

因此,

$$\phi = 1/(1+0.0772) = 0.9283$$

- 11.16^D 0.012kg 乙烷和 0.022kg 丙烷,在过余 15% (质量百分比)的空气中燃烧,计算 A/F 摩尔。

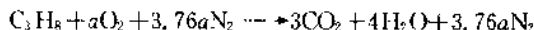
解 对乙烷的燃烧



式中,对氧作平衡,得 $a = 7/2$,因此,空气/乙烷比是 $(4.76)(3.5)/1 = 16.66\text{kmol 空气/kmol C}_2\text{H}_6$ 。

所以,0.012kg C_2H_6 需要 $(0.012/30)(16.66) = 6.667 \times 10^{-3}\text{kmol 空气}$ 。

同样,对丙烷,



式中,由氧的平衡,得 $a = 5$,故空气/丙烷比是 $(4.76)(5)/1 = 23.8\text{kmol 空气/kmol C}_3\text{H}_8$ 。所以

0.022kg C_3H_8 需要 $(0.022/44)(23.8) = 11.900 \times 10^{-3}\text{kmol 空气}$ 。这样,总共消耗的空气质量为

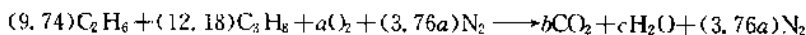
$$(1.15)[(6.667 + 11.900)(10^{-3})] = 21.35 \times 10^{-3}\text{kmol}$$

所以,

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} = \frac{21.35 \times 10^{-3}}{(0.012/30) + (0.022/44)} = \frac{23.72}{1}$$

- 11.17 用理想气体的体积分数计算为基础验算题 11.16,假定通过燃烧室的气体的压强,温度分别为 120kPa 和 78.6°C,且仅产生水蒸气。

解 对理想气体 $V = (m/M)(R_g T/P)$,因此,在给定的条件下,0.012kg 乙烷($M=30$)所占体积为 $9.74 \times 10^{-3}\text{m}^3 = 9.74\text{L}$,而 0.022kg 丙烷($M=44$)所占体积为 12.18L,对化学当量方程式配平,有



可得

$$a = 95.00\text{L}, \quad b = 56.02\text{L}, \quad c = 77.97\text{L}$$

再将过余空气量考虑进去,得

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{体积}} = \frac{(1.15)(95.00)(4.76)}{9.74 + 12.18} = \frac{23.72}{1}$$

- 11.18 给出题 11.17 燃烧反应产物的体积百分分析。

解 在化学当量方程式右边加上 $(0.15)[a\text{O}_2 + (3.76a)\text{N}_2]$ 表示过余空气,可得分析结果(以升为单位):

$$\begin{array}{lll} \text{CO}_2: & b = 56.02 & \text{H}_2\text{O}: \quad c = 77.94 \\ \text{O}_2: & 0.15a = 14.25 & \text{N}_2: \quad (1.15)(3.76a) = 410.78 \end{array}$$

转换为百分数(总数=559):

$$\% \text{CO}_2 = 10.0\%, \quad \% \text{H}_2\text{O} = 13.9\%, \quad \% \text{O}_2 = 2.6\%, \quad \% \text{N}_2 = 73.5\%$$

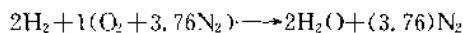
- 11.19 将题 11.18 的体积百分比转换成质量百分分析。

解 在题 11.17 的条件下,题 11.18 的体积百分数即为摩尔百分数 x_i ,所对应的质量百分数

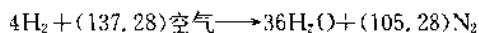
$$\mu_i = x_i M_i / \sum x_j M_j, \text{示于表 11-1.}$$

表 11-1

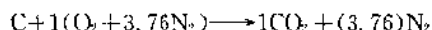
	x /(%)	M	xM	$\mu = xM / \sum xM$ /(%)
CO_2	10.0	44	440.0	0.1554
H_2O	13.9	18	250.2	0.0884
O_2	2.6	32	83.2	0.0294
N_2	73.5	28	2058.0	0.7268
$\sum xM$			2831.4	

11.20 验证表 G1(附录 G)的第一行.**解** 系数以 kmol 为单位的化学当量方程是

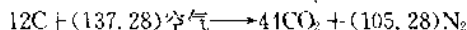
各项乘以各自的分子量,得到系数以 kg 为单位的方程:

现在各项除以 H_2 的系数,得到以 AMU(即无量纲)为基础的新系数:

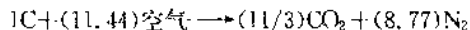
考虑到有关空气组成的公式比较粗糙,此式与表 G1 已相当一致.

11.21 验证表 G1 的第二行.**解** 系数以 kmol 为单位的化学当量方程式是

各项乘以各自的分子量得到系数以 kg 为单位的方程:



现在,归一化至 AMU,



此表述与表中值相当一致.

11.22 利用表 G1 校验题 11.10, 11.11.**解** 1AMU 乙烷(C_2H_6)中将有 $(24/30)$ AMU 的 C 和 $(6/30)$ AMU 的 H_2 参加反应. 因此,需要 $(24/30)(11.5) + (6/30)(34.5) = 16.1$ AMU 的空气参加反应,所以,对 100% 的过余空气,有

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \frac{2(16.1\text{AMU})}{1\text{AMU}} = 32.2$$

可与题 11.10 和 11.11 的 32.097 比较.

11.23 0.025lb_m 的乙烷和 0.050lb_m 的丙烷在过余 15% (按质量百分比计) 的空气中燃烧. 利用表 G1 求 $(A/F)_{\text{质量}}$.**解** 0.025lb_m 乙烷(C_2H_6)将包含 $(24/30)(0.025) = 0.020$ lb_m 的碳和 $(6/30)(0.025) = 0.005$ lb_m 的氢. 而 0.050 lb_m 的丙烷(C_3H_8)将包含 $(36/44)(0.050) = 0.041$ lb_m 的碳和 $(8/44)(0.050) = 0.009$ lb_m 的氢. 因此,该混合燃料包含 0.061 lb_m 的碳和 0.014 lb_m 的氢. 由表 G1 每 1 lb_m 碳(以 C 参加反应)需要 11.5 lb_m 空气作当量燃烧,故 0.061 lb_m 碳将需要 $(0.061)(11.5) = 0.702$ lb_m 空气. 同样,0.014 lb_m 的氢(以 H_2 参加反应)将需要 $(0.014)(34.5) = 0.483$ lb_m 的空气,故总的空气需要量是 1.185 lb_m. 因此,包含 15% 过余空气,

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \frac{(1.15)(1.185)}{0.025 + 0.050} = \frac{18.17}{1}$$

11.24^D 对题 11.23 的燃烧反应,计算 $(A/F)_{\text{摩尔}}$. [注意: 15% 按质量计的过余量等于 15% 按摩尔计的过余量]**解** 对 C_2H_6 , 当量燃烧反应为故 $2a = 2(2) + 3 = 7$, 即 $a = 7/2$. 因此,空气/燃料比是 $4.76a/1 = 16.66$ lb_m mol 空气/lb_m mol C_2H_6 , 而 0.025lb_m C_2H_6 将需要 $(0.025/30)(16.66) = 0.0139$ lb_m mol 空气. 同样对丙烷,有 $\text{C}_3\text{H}_8 + a\text{O}_2 + 3.76a\text{N}_2 \longrightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 3.76a\text{N}_2$, 可得 $a = 5$, 空气/燃料比为 $4.76a/1 = 23.8$ lb_m mol 空气/lb_m mol C_3H_8 . 因此,0.050lb_m C_3H_8 将需要 $(0.050/44)(23.80) = 0.0270$ lb_m mol 空气. 所以,

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} = \frac{(1.15)(0.0139 + 0.0270)}{(0.025/30) + (0.050/44)} = \frac{23.87}{1}$$

11.25 0.025lb_m 乙烷(C_2H_6)和 0.050lb_m 丙烷(C_3H_8)封闭在一容器中与过余 20% (以质量百分比为基础) 的空气作燃烧反应. 燃烧前混合物的压强和温度分别为 15psia 和 75°F. 试确定: (a) 燃烧前混合物的空气/燃料质量百分比; (b) 容器的体积(ft³).**解** (a) 由题 11.23, 当过余空气是 15% 时, $(A/F)_{\text{质量}} = 18.17$, 因此, 对 20% 的过余空气,

$$(A/F)_{\text{质量}} = (1.20/1.15)(18.17) = 18.96$$

(b) 理想气体状态方程给出体积分数 $V_i = (m_i/M_i)(R_u T/P)$, 因此, 对本题三种成分的混合气体, 有

$$V = \frac{R_u T}{P} \sum \frac{m_i}{M_i} = \frac{(1545)(535)}{(15)(144)} \left[\frac{0.025}{30} + \frac{0.050}{44} + \frac{(18.96)(0.075)}{28.966} \right] = 19.5 \text{ ft}^3$$

- 11.26 (a) 如果乙烷(C_2H_6)在空气中燃烧后, 其燃烧产物既有一氧化碳, 又有二氧化碳, 证明燃烧每摩尔乙烷需要 4.76a 摩尔的空气, 且 $5/2 < a < 7/2$; (b) 探讨燃烧产物的露点为 25°C 的条件, 假定反应在总压强为 1atm 的环境下发生。

解 11.26 (a) 令 $\text{C}_2\text{H}_6 + a\text{O}_2 + 3.76a\text{N}_2 \longrightarrow \alpha\text{CO} + \beta\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 3.76a\text{N}_2$

然后, 平衡等号两边的 C 原子数, 得 $2 = \alpha + \beta$, 再平衡氧原子数, 得 $2a = \alpha + 2\beta + 3$, 由此解得, $\alpha = 7 - 2a$, $\beta = 2a - 5$, 因此, α 和 β 两者都要取正, 只能让 $a < 7/2$ 和 $a > 5/2$ 。

(b) 燃烧产物中水的摩尔分数是

$$x_w = \frac{3}{a + \beta + 3 + 3.76a} = \frac{3}{5 + 3.76a}$$

求水的分压强(假定水为蒸汽) $P_w = x_w P = x_w (1.01325 \text{ bar})$, 将此式与水在 25°C 的饱和蒸汽压 0.03169bar 相等, 由此解得 $a = 24.18$, 此值超出了 a 的可能取值范围。

- 11.27 乙烷在空气中燃烧, 其燃烧产物中一氧化碳和二氧化碳的摩尔数相等, 则以摩尔分数为基础的空气/燃料比是多少?

解 11.27 在题 11.26(a) 中, $\alpha = \beta$, 可得 $a = 3$ 。在这种情况下,

$$(A/F)_{\text{摩尔}} = (4.76)(3)/1 = 14.28/1$$

- 11.28 求题 11.27 燃烧产物的露点温度, 假定总压强是 1atm。

解 11.28 由题 11.26(b), $P_w = 3(1.01325)/[5 + (3.76)(3)] = 0.18672 \text{ bar}$

在表 A2 中查找可发现此压强出现在 330K 和 340K 之间; 若采用线性插值, 可得

$$T_{\text{露点}} \approx 330 + [(0.1867 - 0.1719)/(0.2713 - 0.1719)](10) = 331.49\text{K} = 58.3^\circ\text{C}$$

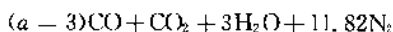
- 11.29 利用表 A1 校验题 11.28 的结果。

解 11.29 因为 1atm = 14.696psia, $P_w = 3(14.696)/[5 + (3.76)(3)] = 2.708 \text{ psia}$, 在表 A1, 120°F 和 140°F 之间插值, 得

$$T_{\text{露点}} \approx 120 + [(2.708 - 1.694)/(2.891 - 1.694)](20) = 136.9^\circ\text{F} = 58.3^\circ\text{C}$$

- 11.30 乙烷在空气中燃烧, 产生相等的一氧化碳和二氧化碳。若所有过程都在大气压下进行, 则在题 11.28 中求得露点温度大约为 58.3°C 。如果将燃烧产物冷却到 20°C , 多少百分比的水蒸气被冷凝下来?

解 11.30 燃烧产物可求得为



当冷却到 20°C , 在此温度下水的饱和蒸汽压是 0.02339bar, 水蒸气的摩尔分数为

$$x_{20^\circ\text{C}} = 0.02339/1.01325 = 0.02308$$

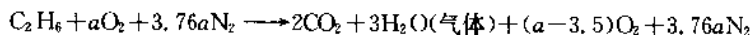
气相产物现在是 $(1 + 1 + n_{\text{H}_2\text{O}} - 11.82) \text{ mol}$, 故

$$n_{\text{H}_2\text{O}}/(13.28 + n_{\text{H}_2\text{O}}) = 0.02308 \quad \text{即} \quad n_{\text{H}_2\text{O}} = 0.3137$$

而在 58.3°C 时有 3mol 的水蒸气, 而现在为 0.3137mol, 所以冷凝的百分数为 $(3 - 0.3137)/3 \approx 90\%$ 。

- 11.31^D 当乙烷(C_2H_6)在空气中燃烧, 燃烧产物的露点恰好为 50°C , 则以质量分数为基准的空气/燃料比是多少? 假定所有反应物和生成物都在大气压下进入与离开。

解 11.31 参照题 11.26(a), 暂且假定有足够的空气存在 ($a > 7/2$), 使得仅有 CO_2 形成,



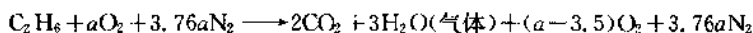
在燃烧产物中水蒸气的摩尔分数是 $x_w = 3/(1.5 + 4.76a)$, 将水蒸气分压强的关系, $x_w(1.01325 \text{ bar})$ 和 50°C 下饱和蒸汽的压强 0.12343bar(由表 F3)等同起来, 可确定 $a = 4.85$, 所以,

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} \cdot \frac{M_A}{M_F} = \frac{(4.76)(4.85)}{1} \cdot \frac{28.966}{30.070} = 22.24$$

- 11.32^D 当乙烷(C_2H_6)在空气中燃烧, 燃烧产物的露点恰好为 100°F , 则以质量分数为基准的

空气/燃料比是多少? 假定所有反应物和生成物都在大气压下进入与离开。

解 参照题 11.26(a), 暂且假定有足够的空气存在($a > 7/2$), 没有 CO 形成, 反应方程成为



燃烧产物中水蒸气的摩尔分数是 $x_w = 3/(1.5 + 4.76a)$, 将水蒸气的分压强 $x_w(1.4696\text{psia})$ 和 100°F 下饱和蒸汽的压强 0.9500psia (从表 F2 得) 相等可得 $a = 9.44$, 所以,

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} \cdot \frac{M_1}{M_2} = \frac{(4.76)(9.44)}{1} \cdot \frac{28.966}{30.070} = 43.28$$

11.33 在题 11.17 的燃烧反应中假定无液态 H_2O 生成, 确认该假定的正确性。

解 液态水存在的条件是水的分压强超过给定温度下的饱和蒸汽压。现在 78.6°C , 水的摩尔分数是 0.139 (参见题 11.18), 求得分压强为 $(0.139)(120\text{kPa}) = 0.167\text{bar}$, 表 A2 给出在 351.6K 的饱和蒸汽压 $P_g \approx 0.45\text{bar}$, 因此, 假定正确, 没有凝结。

11.34 乙烷气 (C_2H_6) 在空气中燃烧, 质量比是 1:20, 空气过剩度的百分比是多少?

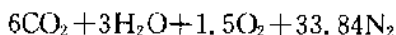
解 由题 11.22, 化学反应当量质量比为 1:16.1, 因此, 空气过剩度的百分比是

$$[(20-16.1)/16.1](100\%) = 24.2\%$$

11.35 区别燃烧产物的湿分析和干分析。

解 如果以体积分数为基准的分析考虑所产生的(干)水蒸气, 则为湿分析; 如果不管生成物中凝结水(非常少)部分所占的体积(当生成物中水的分压强大于混合物温度下水蒸气的饱和压强), 则为干分析。

11.36 当 1kmol 苯 (C_6H_6) 在 20% 的过剩空气中燃烧, 其产物是:



求: (a) 生成物中 CO_2 的摩尔分数; (b) CO_2 的质量分数。

解 (a) 在总共 $n = 6 + 3 + 1.5 + 33.84 = 44.34\text{ kmol}$ 产物中, 6kmol 是 CO_2 , 故

$$x_{\text{CO}_2} = 6/44.34 = 0.1353$$

(b) 产物的总质量是

$$m = \sum n_i M_i = (6)(44) + (3)(18) + (1.5)(32) + (33.84)(28) = 1313.5\text{kg}$$

其中 $(6)(44) = 264\text{kg}$ 是 CO_2 , 因此, $\mu_{\text{CO}_2} = 264/1313.5 = 0.2010$ 。

11.37 计算题 11.36 生成混合物的分子质量。

解 $M = m/n = (1313.5\text{kg})/(44.34\text{kmol}) = 29.62\text{kg/kmol}$

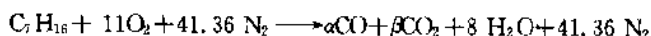
11.38 对题 11.36 的燃烧, 计算: (a) 基于质量分数的空气/燃料比。 (b) 产物中二氧化碳基于体积分数的百分比, 假定产物中的水为气态。

解 (a) 燃料的质量是 $(1\text{kmol})(78\text{kg/kmol}) = 78\text{kg}$, 产物的质量是 1313.5kg , 因此有 $1313.5 - 78 = 1235.5\text{kg}$ 空气存在(对反应物还要加上过剩量), 期望的比例是 $1235.5/78 = 15.84/1$ 。

(b) $x_{\text{CO}_2} = 13.53\%$ (所有成分均为气态)。

11.39 1mol 气态庚烷 (C_7H_{16}) 和 52.36mol 空气发生燃烧反应。假定为完全燃烧, 计算产物中 H_2O , CO , CO_2 , N_2 和 O_2 的摩尔数和过剩空气的百分数(如果存在)。

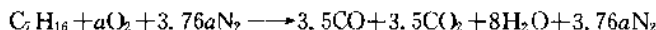
解 每 4.76mol 空气包含 1mol O_2 , 52.36mol 空气包含 $52.36/4.76 = 11\text{mol O}_2$ 和 $52.36 - 11 = 41.36\text{mol N}_2$, 因此,



由 C 的平衡, $7 = \alpha + \beta$; 由 O 的平衡, $22 = \alpha + 2\beta + 8$, 故 $\alpha = 0, \beta = 7$ 。所求值为 0mol CO , 7mol CO_2 , 41.36mol N_2 , 0mol O_2 , 最后一组数据表明无过剩空气。

11.40 当 1mol 气态苯 (C_7H_{16}) 在空气中燃烧, 生成物(所有气体均为 25°C) 包含一氧化碳、二氧化碳各 3.50mol 。(a) 生成了多少摩尔 H_2O (气态), N_2 和 O_2 ? (b) 基于体积分数的空气/燃料比是多少? (c) 过剩空气的百分比是多少?

解 (a) 由于生成物中不是仅有二氧化碳,故空气量不富裕,列方程:



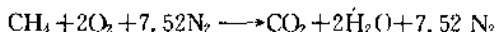
对氧取平衡,得 $a=9.25$,所生成的 N_2 的摩尔数是 $(3.76)(9.25)=34.78$, H_2O (气态) 的摩尔数是 8,而 O_2 是 0.

$$(b) \quad \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{体积}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} - \frac{(4.76)(9.25)}{1} = \frac{44.03}{1}$$

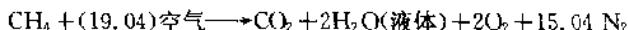
(c) 零.

- 11.41 甲烷在 100% 的过余空气中燃烧,并伴有液态 H_2O 生成,求在气态生成物中二氧化碳的摩尔分数,假定燃烧是完全的.

解 因没有过余空气,则



故每摩尔燃料,需要 $2+7.52=9.52\text{mol}$ 空气. 而实际反应方程为

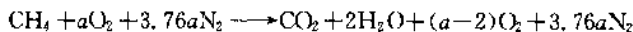


因此,

$$x_{\text{CO}_2} = 1/(1+2+15.04) = 0.055$$

- 11.42 1 mol 甲烷在空气中燃烧,可生成 1mol CO_2 ,要使生成物中 CO_2 的摩尔分数为 6.54%,其等效当量比是多少?

解 必须有过余空气存在,不然的话,由题 11.41, CO_2 的摩尔分数为 $1/(1+2+7.52)=0.095$. 因此,列方程:

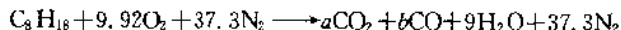


令 CO_2 的摩尔分数 $1/(1+2+a-2+3.76a)=0.0654$,求得 $a=3.00$,这比当量值 ($a=2$) 增加了 50%,由题 11.2(d) 给出的公式,得

$$\phi = 1/(1+0.50) = 2/3$$

- 11.43 当 1kg 辛烷 (C_8H_{18}) 气体和 12kg 空气燃烧时,生成物中二氧化碳的摩尔分数是多少?

解 1kg 辛烷是 $1/[8(12)+18(1)]=0.00877\text{kmol}$ 辛烷. 12kg 空气是 $12/28.966=0.4143\text{kmol}$ 空气 $= (0.0870\text{kmol O}_2) + (0.3273\text{kmol N}_2)$. 故 $0.00877\text{C}_8\text{H}_{18}$ (气) $+ 0.0870\text{O}_2 + 0.3273\text{N}_2$ 发生反应,即对 1mol 辛烷有: $\text{C}_8\text{H}_{18} + 9.92\text{O}_2 + 37.3\text{N}_2$ 发生反应. 当量氧——无 CO 产生——为 $(16+9)/2=12.50$, (因 $9.92<12.5$), 故 CO 和 CO_2 都会产生.

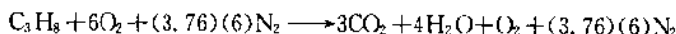


通常假定所有氢都被氧化,根据 C 和 O 的平衡,得 $a=2.84, b=5.16$. 所以,

$$x_{\text{CO}_2} = a/(a+b+9+37.3) = 0.0523$$

- 11.44 丙烷 (C_3H_8) 在过余 20% 的空气中完全燃烧,计算每一燃烧产物的质量百分比.

解 燃烧方程 (参见题 11.16)



给出产物质量为

$$3(44)=132\text{AMU CO}_2, \quad 4(18)=72\text{AMU H}_2\text{O}$$

$$1(32)=32\text{AMU O}_2, \quad (3.76)(6)(28)=631.68\text{AMU N}_2$$

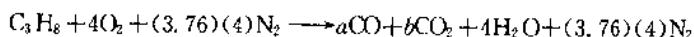
这些数据转换为 15.2% CO_2 , 8.3% H_2O , 3.7% O_2 , 72.8% N_2 .

- 11.45 当 1mol C_3H_8 在空气中燃烧时,需利用 4mol O_2 . 这一反应中当量空气的百分比是多少?

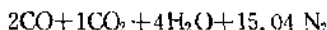
解 对反应所需的当量空气,题 11.16 给出 $a=5\text{mol O}_2/\text{mol C}_3\text{H}_8$, 故 $4/5=80\%$ 的当量空气.

- 11.46 题 11.45 燃烧产物的摩尔数是多少?

解 由于 CO 和 CO_2 都在产物中出现,故



式中按常规假定氢气被完全氧化. 配平方程式得 $a=2, b=1$. 所以,反应产物是



11.47 对题 11.45 的燃烧产物作出基于干分析的、以体积分数为基准的研究。

解 由题 11.46, 生成物不计水的体积分数(=摩尔分数)如下:

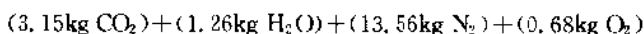
$$\text{CO}: 2/18.04 = 0.1108$$

$$\text{CO}_2: 1/18.04 = 0.0554$$

$$\text{N}_2: 15.04/18.04 = 0.8337$$

11.48 汽油构成的质量百分比是 86% C, 14% H₂, 假定在过余 20% 空气中完全燃烧, 生成物含水蒸气计算燃烧产物的体积百分数。

解 每公斤汽油燃料, 含 0.86kg C 和 0.14kg H₂, 所对应的空气需要量是(表 G1) (0.86)(11.5) = 9.98kg 空气和 (0.14)(34.5) = 4.83kg 空气, 因此, 总的实际所需的空气是 (1.2)(9.89 + 4.83) = 17.66kg, 如空气中 O₂ 的质量百分比是 23.2%, 再利用表 G1 得



式中右边最后一项, 由过余空气引起, 可用差值得到。由于所有生成物均为气体, 体积百分数可用下式求得

$$x_i = n_i / \sum n_i = (m_i/M_i) / \sum (m_i/M_i)$$

计算结果如表 11-2 所示。

表 11-2

	m	M	m/M	x
CO ₂	3.15	44	0.072	0.111
H ₂ O	1.26	18	0.07	0.108
N ₂	13.56	28	0.484	0.748
O ₂	0.68	32	0.021	0.032
	Σ		0.647	

11.49 以干分析重解题 11.48。

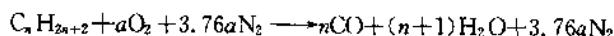
解 这要求假定生成水处在液态。因此, 我们只需删去表 11-2 中的第二行, 并重新作归一化计算, 见表 11-3。

表 11-3

	m	M	m/M	x
CO ₂	3.15	44	0.072	0.125
N ₂	13.56	28	0.484	0.839
O ₂	0.68	32	0.021	0.036
	Σ		0.577	

11.50 一碳氢化合物, C_nH_{2n+2}, 和当量空气发生燃烧反应, 证明如果仅生成 CO, 则以摩尔分数为基准的空气/燃料比是 (2.38)(2n+1)/1; 如果仅生成 CO₂, 则为 (2.38)(3n+1)/1。

解 令



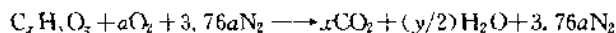
根据氧的平衡得 $a = (2n+1)/2$, 因此,

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} = \frac{4.76[(2n+1)/2]}{1} = \frac{2.38(2n+1)}{1}$$

仿此可求得另一种情况。

11.51 一碳水化合物, C_nH_yO_z, 与当量空气发生燃烧反应, 而使生成物中仅有 CO₂ 出现, 计算: (a) (A/F)_{摩尔}; (b) (A/F)_{质量}。

解 (a) 在下式中氧取平衡:

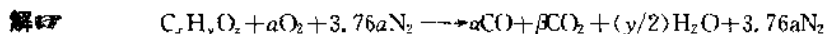


求得 $a = (4x + y - 2z)/4$, 因此,

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} = \frac{4.76[(4x + y - 2z)/4]}{1} = \frac{(1.19)(4x + y - 2z)}{1}$$

$$(b) \quad \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} \times \frac{M_1}{M_2} = \frac{(1.19)(4x + y - 2z)}{1} \cdot \frac{28.97}{12x + y + 16z}$$

- 11.52 参照题 11.51, 证明当生成物中既有 CO 又有 CO_2 时, $(A/F)_{\text{摩尔}}$ 必须被限制在宽度为 $2.38x$ 的间隔内.



式中氢已经平衡, 平衡 C, 得 $x = \alpha + \beta$; 平衡 O, 得 $2a + z = \alpha + 2\beta + (y/2)$, 解此得

$$\beta = 2a + z - (y/2) - \alpha, \quad \alpha = 2x - 2a - z + (y/2)$$

而 α 和 β 必须都为正, 所以必有

$$\left(\frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) + \frac{x}{2} < a < \left(\frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) + x$$

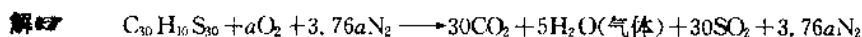
由上式即可求得所述结果.

- 11.53 用刚好两倍当量的空气燃烧 1kmol 成分为 $\text{C}_{2.6}\text{H}_{0.7}\text{N}_3\text{OS}_6$ 的煤时, 以质量分数为基准的空气/燃料比是多少?

解 煤的原子量是 $(2.6)(12) + (0.7)(1) + (3)(14) + (1)(16) + (6)(32) = 281.9\text{kg/kmol}$, 1kmol 煤有 $(2.6)(12) = 31.2\text{kg C}$, 需要 $(31.2)(11.5) = 358.8\text{kg}$ 空气作当量燃烧; 而 $(0.7/2)(2) = 0.7\text{kg H}_2$, 需要 $(0.7)(34.5) = 24.2\text{kg}$ 空气; $(3)(14) = 42\text{kg N}$, 这是中性气体, 与反应无关; $(1/2)(32) = 16\text{kg O}_2$, 减少空气需要量 $16/0.232 = 69.0\text{kg}$; $(6)(32) = 192\text{kg S}$, 需要 $(192)(4.3) = 825.6\text{kg}$ 空气; 故全部空气需要量是 $358.8 + 24.2 - 69.0 + 825.6 = 1140\text{kg}$, 因此, 考虑过剩空气, 则

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \frac{2(1140)}{281.9} = 8.09$$

- 11.54 燃烧 $\text{C}_{30}\text{H}_{10}\text{S}_{30}$, 需要多少摩尔空气? 假定生成物为气态, 生成物中无 CO 和剩余的 O_2 , 并且生成物中 CO_2 的体积百分含量刚好为 10%.



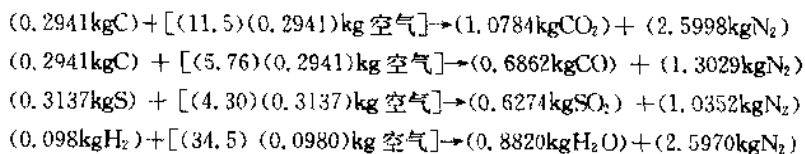
并且, 对 10% 的 CO_2 有 $30/(30 + 5 + 30 + 3.76a) = 0.10$, 即 $a = 62.5$. 因此, 需要 $4.76a = 297.5\text{mol}$ 空气.

- 11.55 题 11.54 中, 当量空气/燃料比是多少?

解 在题 11.54 中已很精确地求出, 每摩尔燃料需 297.5 摩尔空气. 因为如生成物中没有 CO 和 O_2 , 则假定燃烧是完全的.

- 11.56^D $1\text{kg C}_{10}\text{H}_{20}\text{S}_2$ 的燃料和 9.8076kg 空气发生燃烧反应, 生成物为二氧化碳、一氧化碳、氮、二氧化硫和水的混合气体, 假定硫被完全氧化, 求燃烧产物的质量百分分析.

解 $\text{C}_{10}\text{H}_{20}\text{S}_2$ 的分子量是 $(10)(12) + (20)(1) + (2)(32) = 204\text{kg/kmol}$, 故对每 kg 燃料, 有 $(10)(12)/204 = 0.5882\text{kg C}$, $(20)(1)/204 = 0.0980\text{kg H}$, $(2)(32)/204 = 0.3137\text{kg S}$. 由于氢和硫被完全氧化, 需要 $(0.0980)(34.5) + (0.3137)(4.3) = 4.731\text{kg}$ 空气. 又因为对每千克燃料, 提供了 9.8076kg 空气, 则有 $9.8076 - 4.731 = 5.077\text{kg}$ 空气来氧化碳, 而碳已求得有 0.5882kg . 另一方面, 有 $5.077/0.5882 = 8.630\text{kg}$ 空气/ kg C , 而生成 CO 和 CO_2 所需的比例分别为 5.76 和 11.50, 故生成物为这二者的混合物. 若 CO 的份额为 α , 则 $(5.76)\alpha + (11.50)(1 - \alpha) = 8.630$. 解得 $\alpha = 0.50$, 所以,



所以,生成物是 1.0784kg CO₂, 0.6862kg CO, 0.6274kg SO₂, 0.8820kg H₂O 和 7.5349kg N₂, 总量是 10.8089kg [= (1+9.8076)kg, 在允许舍入误差范围内], 因此, 生成物的质量百分成分分析为

$$\begin{aligned}\text{CO}_2: & 1.0784/10.8089=10.0\%, & \text{CO}: & 6.3\% \\ \text{SO}_2: & 5.8\%, & \text{H}_2\text{O}: & 8.2\%, & \text{N}_2: & 69.7\%\end{aligned}$$

- 11.57^D 1lb_m C₁₀H₂₀S₂ 的燃料和 15lb_m 空气发生燃烧反应, 生成物是二氧化碳、一氧化碳、氮、二氧化硫和水的混合气体, 假定硫被完全氧化, 给出燃烧产物的质量百分分析。

解 C₁₀H₂₀S₂ 的摩尔质量是

$$(10)(12) + (20)(1) + (2)(32) = 204 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{ mole}$$

故每 lb_m 燃料, 有

$$[(10)(12)]/204 = 0.5882 \text{ lb}_m \text{ C}$$

$$(20)(1)/204 = 0.0980 \text{ lb}_m \text{ H}$$

$$(2)(32)/204 = 0.3137 \text{ lb}_m \text{ S}$$

由于氢和硫被完全氧化, 需要

$$(0.0980)(34.5) + (0.3137)(4.3) = 4.731 \text{ lb}_m \text{ 空气}$$

故有 15 - 4.731 = 10.269 lb_m 空气来氧化碳, 而碳为 0.5882 lb_m, 即 10.269/0.5882 = 17.458 lb_m 空气/lb_m C. 因为将 C 氧化为 CO 所需的空气/燃料比仅为 5.76 lb_m 空气/lb_m C, 而将 C 氧化为 CO₂ 所需的比为 11.50 lb_m 空气/lb_m C. 对于 17.458 lb_m 空气/lb_m C 的总供应量, 生成物中将包含未燃烧的氧。

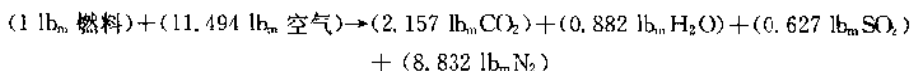
因此

$$(0.5882 \text{ lb}_m \text{ C}) + [(11.5)(0.5882) \text{ lb}_m \text{ 空气}] \rightarrow (2.157 \text{ lb}_m \text{ CO}_2) + (5.200 \text{ lb}_m \text{ N}_2)$$

$$(0.0980 \text{ lb}_m \text{ H}_2) + [(34.5)(0.0980) \text{ lb}_m \text{ 空气}] \rightarrow (0.882 \text{ lb}_m \text{ H}_2\text{O}) + (2.597 \text{ lb}_m \text{ N}_2)$$

$$(0.3137 \text{ lb}_m \text{ S}) + [(4.3)(0.3137) \text{ lb}_m \text{ 空气}] \rightarrow (0.627 \text{ lb}_m \text{ SO}_2) + (1.035 \text{ lb}_m \text{ N}_2).$$

即总方程为



这是当量反应方程. 15 - 11.494 = 3.506 lb_m 过剩空气将残留在生成物中. 由于

$$(0.233)(3.506) = 0.817 \text{ lb}_m \text{ O}_2, \quad (0.767)(3.506) = 2.689 \text{ lb}_m \text{ N}_2$$

因此, 对于总数为 16 lb_m 的生成物, 质量百分成分分析为

$$\text{CO}_2: 2.157/16=13.5\%, \quad \text{H}_2\text{O}: 0.882/16=5.5\%, \quad \text{SO}_2: 0.627/16=3.9\%$$

$$\text{O}_2: 0.817/16=5.1\%, \quad \text{N}_2: 11.521/16=72.0\%,$$

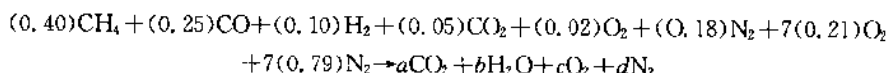
- 11.58 气体燃料的体积百分成分分析为:

$$\text{CH}_4: 40\%, \quad \text{CO}: 25\%, \quad \text{H}_2: 10\%$$

$$\text{CO}_2: 5\%, \quad \text{O}_2: 2\%, \quad \text{N}_2: 18\%$$

该燃料在空气(体积百分数为 21% 氧, 79% 氮)中以一体积的燃料对 7 体积的氧气的比例进行燃烧反应. 确定排出气体的体积百分成分分析. 假定无一氧化碳生成且生成的水为气态。

解 一体积燃料的燃烧反应为



取 C, H, O 和 N 的体积平衡, 得 $a=0.7, b=0.9, c=0.515, d=5.53$.

因此, 生成物是 0.7CO₂ + 0.9H₂O + 0.515O₂ + 5.53N₂, 总量为 7.645 体积. 所以, 体积百分数为

$$\text{CO}_2: 0.7/7.645=0.0916, \quad \text{H}_2\text{O}: 0.9/7.645=0.1177$$

$$\text{O}_2: 0.515/7.645=0.0674, \quad \text{N}_2: 5.53/7.645=0.7233$$

- 11.59 反应气体的体积成分分析为

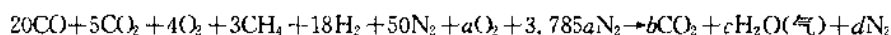
$$\text{CO}: 20\%, \quad \text{CO}_2: 5\%, \quad \text{O}_2: 4\%$$

$$\text{CH}_4: 3\%, \quad \text{H}_2: 18\%, \quad \text{N}_2: 50\%$$

如果空气的体积百分组成为 20.9% 的 O₂ 和 79.1% 的 N₂, 要完全燃烧 100m³ 反应

气体所需的最小理论空气体积(m^3)是多少?

解 N_2/O_2 比例是 $79.1/20.9=3.785$, 因此, 以 m^3 为基准求系数.



对 C, H, O 取平衡, 得 $a=21(b=28, c=24)$, 因此所需空气的最小体积为 $[(4.785)(21)]=100.485 \text{ m}^3$.

- 11.60 对 1500 ft^3 题 11.59 所列的反应气体作当量燃烧反应时, 所需的最小体积(ft^3)的空气是多少?

解 题 11.59 的全部分析都可在此引用并通过改变比例求得结果. 若每 100 m^3 气体需要 100.485 m^3 空气, 则 1500 ft^3 气体需要 $1500(100.485/100)=1507 \text{ ft}^3$ 空气.

- 11.61 题 11.59 中的体积变化是多少?

解 100 m^3 气体和 100.485 m^3 空气混合得到 $28+24+129.485=181.485 \text{ m}^3$ 燃烧产物[由 N_2 平衡得 $d=129.485$], 这表示比反应气体的 100 m^3 增加了 81.485 m^3 , 而比初始燃烧混合物体积 200.485 m^3 减少 19 m^3 .

- 11.62 题 11.59 生成物以湿分析为基础的体积百分成分分析是多少?

解 以湿分析为基础, 将包含蒸汽的体积, 而总体积为 181.485 m^3 . 因此,

$$\% \text{CO}_2 = (28/181.485)(100) = 15.4$$

$$\% \text{H}_2\text{O} = (24/181.485)(100) = 13.2$$

$$\% \text{N}_2 = (129.485/181.485)(100) = 71.3$$

- 11.63 题 11.59 生成物以干分析为基础的体积百分成分分析是多少?

解 以干分析为基础, 将去除水的体积, 而总体积为 $28+129.485=157.49 \text{ m}^3$. 因此,

$$\% \text{CO}_2 = (28/157.49)(100) = 17.8, \quad \% \text{N}_2 = 82.2$$

- 11.64 一种煤, 其质量百分成分分析为碳 70%, 氢 5%, 氧 5%, 氮 10%, 水 5% 和灰 5%, 将其与 100% 过余空气燃烧, 计算 $(A/F)_{\text{质量}}$.

解 表 11-4 列出了煤以 100AMU(任意质量单位)为基准的 $(A/F)_{\text{当量质量}}$ 的计算结果.

表 11-4

成分	质量(AMU)	AMU 空气/AMU 成分	所需空气(AMU)
C	70	11.5	805
H ₂	5	34.5	172.5
O ₂	5	-4.31	-21.6
N ₂	10	—	0
H ₂ O	5	—	0
灰	5	—	0
总燃料	100	总空气	955.9

O_2 前面的负号, 其意义见题 11.53, 对有 100% 过余空气的情况,

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \frac{2(955.9 \text{ AMU})}{100 \text{ AMU}} = \frac{19.12}{1}$$

- 11.65 题 11.59 中, 二氧化碳在燃烧产物中的质量百分数是多少?

解 将该题中的当量系数理解成摩尔数, 可得

$$\mu_{\text{CO}_2} = \frac{b(44)}{b(44) + c(18) + d(28)} = \frac{(28)(44)}{(28)(44) + (24)(18) + (129.49)(28)} = 23.3\%$$

奥赛特(Orsat)分析

- 11.66 (a) 什么是奥赛特分析? (b) 即使当气态混合物以气泡形式通过含水溶液时, 为什么会产生基于干分析的组分的浓缩? (c) 通常假定会出现哪些混合生成物?

解 (a) 燃烧产物被分别依次暴露在苛性钾溶液, 焦磷酸溶液和氯化亚铜溶液中以分别去除

CO_2 , O_2 和 CO 。

(b) 如果在分析的每一阶段都达到平衡, 则在所生成的气态混合物中水蒸气总是饱和的。因为分析时的总压强总是(假定是)恒定, 在恒定的大气温度下, 饱和蒸汽压也将恒定, 因此, 所生成的混合物的其他组分的分压强也是常数, 即水蒸气的存在没有任何影响。

(c) CO_2 , O_2 和 CO 的去除将导致气体中只剩下纯氮。

11. 67 奥赛特分析表明在生成的混物流体中, 一氧化碳和氧气均存在, 怎么可能是这样?

解 问题是: 为什么“过剩”的氧没有将碳完全氧化成二氧化碳。可能的答案是: (i) 氧在燃烧区域的停留时间较短, 不足以使所有的碳被完全氧化。(ii) 有足够多的氧存在并足以完全氧化碳, 但温度也许非常高而再将 CO_2 分解为 CO 和 O_2 。

11. 68 一种碳氢燃料, C_xH_y , 在空气中燃烧, 对生成物作 Orsat 分析表明, 有 CO : 4.22%, CO_2 : 8.45%, O_2 : 0%, 求 y/x 。

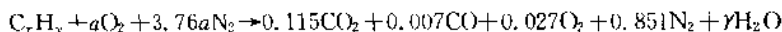
解 生成物的分析是以体积分数为基础的, 也即摩尔分数, 因为平衡物是氮, 氮的百分含量是 87.33%, 以 100mol 干的生成物为基准, 可写出



[1mol 燃料的补充假定不能确定反应? 为什么不能?]. 取 C 的平衡, $x = 4.22 + 8.45 = 12.67$, 取 H 的平衡, $y = 2e$, 取 O 的平衡, $2a = 4.22 + (8.45)(2) + e = 21.12 + e$, 即 $a = 10.56 + 0.5e$, 取 N 的平衡, 得 $a = 23.23$, 因此 $e = 25.34$, $y = 50.68$, 所以, $y/x = 50.68/12.67 = 4/1$ (即燃料是甲烷)。

11. 69 一有效分子式为 C_xH_y 的燃料在空气中燃烧后所产生的 Orsat 分析是 11.5% CO_2 , 0.7% CO 和 2.7% O_2 , y/x 是多少?

解 按题 11.68 的方法。



$$\text{平衡 C: } x = 0.115 + 0.007 = 0.122 \quad \text{平衡 H: } y = 2\gamma$$

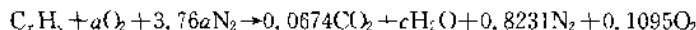
$$\text{平衡 O: } 2a = (0.115)(2) + 0.007 + (0.027)(2) + \gamma \quad \text{即} \quad a = 0.1455 + (1/2)\gamma$$

$$\text{平衡 N: } 3.76a = 0.851 \quad \text{即} \quad a = 0.2263$$

故 $\gamma = 0.1616$, $y = 2\gamma = 0.3232$, 所以 $y/x = 0.3232/0.122 = 2.649$ 。

11. 70 对烷烃碳氢化合物, $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ 在空气中燃烧的产物作 Orsat 分析, 其结果为 $\text{CO}_2 = 0.0674$, $\text{O}_2 = 0.1095$, 确定烷烃的特定形式和燃烧中以摩尔分数为基准的空气/燃料比。

解 因为 Orsat 分析表明无一氧化碳, 反应方程为



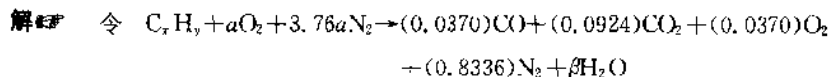
对各元素取平衡, 得

$$x = 0.0674, \quad a = 0.2189, \quad c = 0.0840, \quad y = 0.1680$$

$$\text{故} \quad \frac{y}{x} = \frac{0.1680}{0.0674} \approx 2.5 = \frac{2n+2}{n} = 2 + \frac{2}{n}$$

可得惟一的整数解 $n = 4$, 用因子 $4/x = 59.4$ 重新给平衡方程定标, 在方程左边可得 $\text{C}_4\text{H}_{10} + 13\text{O}_2 + (3.76)(13)\text{N}_2$, 因此烷烃是 C_4H_{10} , 空气/燃料比是 $(4.76)(13)/1 = 61.88/1$ (可发现此混合物刚好是两倍当量)。

11. 71 当奥赛特分析结果为 $\text{CO}_2 = 0.0924$, $\text{CO} = 0.0370$, $\text{O}_2 = 0.0370$, 重解题 11.70。



由平衡可得 $x = 0.1294$, $a = 0.2217$, $\beta = 0.1476$, $y = 0.2952$, 故

$$\frac{y}{x} = \frac{0.2952}{0.1294} \approx 2.28 = 2 + \frac{2}{n}$$

即 $n = 7$, 给各组分重定标后得 $\text{C}_7\text{H}_{16} + 12\text{O}_2 + (3.76)(12)\text{N}_2$, 因此, 燃料是庚烷,

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{理论}} = \frac{(12)(4.76)}{1} = \frac{57.12}{1}$$

11. 72 一碳氢化合物, 在空气中燃烧后产生的 Orsat 分析是: 7.191% CO , 7.191% CO_2 ,

0.000%O₂和85.618%N₂,确定为哪种碳氢化合物.

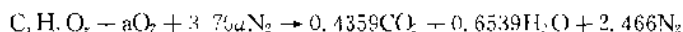
解 平衡 $C_xH_y + aO_2 + 3.76aN_2 \rightarrow 7.191CO + 7.191CO_2 + dH_2O + 85.618N_2$ 可得 $x = 14.382, a = 22.77, y = 47.94$, 故 $y/x = 3.33 \approx 10/3$. 燃料的最简分子式是 C_3H_{10} .

- 11.73 一气体燃料 $C_xH_yO_z$, 在空气中经受一临界(即当量)完全燃烧, 生成物流的质量组分为 19.18% CO₂, 11.77% H₂O, 69.04% N₂. (a) 确定 y/x 和 z/x ; 燃料是什么? (b) 以体积百分分析为基准的空气/燃料比是多少?

解 (a) 作用归一化因子, 得生成的摩尔数

$$19.18/44 = 0.4359CO_2, \quad 11.77/18 = 0.6539H_2O, \quad 69.04/28 = 2.466N_2$$

由于仅求比值, 有



平衡得

$$a = 2.466/3.76 = 0.6559, \quad y/x = 1.3078/0.4359 = 3.000$$

$$z/x = 0.2139/0.4359 = 0.491 \approx 0.500$$

定标后得 $x=2$, 可得分子式为 C_2H_6O (乙醇).

$$(b) \quad \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{体积}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} = \frac{2}{0.4359} \times [(4.76)(0.6559)] = \frac{14.33}{1}$$

- 11.74 对一气体燃料取样, 并对其作干分析得体积百分成分为

$$CO_2: 12\%, \quad O_2: 5\%, \quad N_2: 83\%$$

而当所采样的湿气体在 1bar 下冷却, 其中的水分在 46°C 下开始冷凝. (a) 确定各组分在 1bar, 46°C 下的分压强; (b) 如假定燃料完全由 C 和 H 构成, 燃料气体中的水完全由 H 在燃料中燃烧形成, 估计在燃料中 C 和 H 的质量比.

解 (a) 以干分析为基础的体积百分成分总数是 100%, 故可假定没有 CO 生成, 为完全燃烧. 在 46°C, 水的饱和蒸汽压是 0.10094bar, 这就是在湿混合物中水蒸气的分压强. 另外三个组分的分压强之和是 $\Pi = 1 - 0.10094 = 0.89906\text{bar}$, 现在, 这些分压强由 $P_i = x_i \Pi$ 确定, 式中摩尔分数 x_i 也是体积分数, 因此,

$$P_{CO_2} = (0.12)(0.89906) = 0.10789\text{bar}, \quad P_{O_2} = (0.05)(0.89906) = 0.04495\text{bar}$$

$$P_{N_2} = (0.83)(0.89906) = 0.74662\text{bar}$$

(b) 若反应是 $C_xH_y + aO_2 + 3.76aN_2 \rightarrow 0.10789CO_2 + 0.04495O_2 + 0.74622N_2 + 0.10094H_2O$ 则由 C 的平衡: $x = 0.10789$; H: $y = (0.10094)(2) = 0.20188$, 所以,

$$\frac{m_C}{m_H} = \frac{x(12.011)}{y(1.008)} = 6.37$$

生成焓

- 11.75 定义: (a) 生成焓. (b) 标准生成焓

解 (a) 一物质的生成焓 (ΔH_f) 是一摩尔该物质在恒温、恒压下由它的各组分单元形成时所发生的焓的变化. (b) 标准生成焓 (ΔH_f°) 是在标准状况 (1.013bar 和 298.15K 或 14.696psia 和 537°R) 下形成一物质的生成焓.

- 11.76^D 在 25°C 和 1.013bar 下, 甲醇气体 (CH₃OH 或 CH₄O) 的生成焓是多少?

解 -200900kJ/kmol (由表 G2).

- 11.77^D 在 77°F 和 14.7psia 下乙醇气体 (C₂H₅O) 的生成焓是多少?

解 -101130Btu/lb_m mole (由表 G2).

- 11.78 从表 G2 推导乙醇在 77°F 下的气化焓 (Btu/lb_m).

解 标准气化焓是

$$H_{fg} = \Delta H_f(\text{气}) - \Delta H_f(\text{液}) = -101130 - (-119350) = 18220\text{Btu/lb}_m \text{ mole}$$

因此,

$$\Delta H_{fg} = (18220\text{Btu/lb}_m \text{ mole}) (46.069 \text{ lb}_m / \text{lb}_m \text{ mole}) = 395.5\text{Btu/lb}_m$$

- 11.79 一些热力学表给出甲醇在 290K 下的气化比焓是 1182.2 kJ/kg, 在 300K 下是 1167.3 kJ/kg, 利用这些数据将气态甲醇的生成焓 -200900 kJ/kmol (表 G2) 转化为液态的生成焓。

解 假定甲醇的气化焓在 290K 和 300K 之间是温度的线性函数, 则在 298.15K,

$$h_{fg} = 1182.2 + (8.15/10)(1167.3 - 1182.2) = 1170.1 \text{ kJ/kg}$$

将此转换成 $H_{fg} = 37491 \text{ kJ/kmol}$ (利用表 D1), 则

$$\Delta H_f (\text{液}) - \Delta H_f (\text{气}) = H_{fg} = -200900 - 37491 = -238391 \text{ kJ/kmol}$$

第一定律

- 11.80 定义一物质的显焓 ΔH_s 。

解 在 1 atm 压强和任意给定温度下, ΔH_s 是一物质的实际摩尔焓和它的标准生成焓之间的差值。更一般的燃烧生成物的显焓表列于附录 G (表 G3 和 G4), 它是通过比热容数据的温度多项式计算得到的。由于焓值随着温度的增加而增加, 当低于参考温度 (25°C 或 77°F) 时将出现负值。

- 11.81 推导一个在化学反应中产生或吸收热量的方程式。假定没有相互作用的功, 没有宏观能量变化, 且这过程为一种恒压流动。

解 在所述假定下, 稳定流动能量方程简化为 (P = 生成物, R = 反应物)

$$\begin{aligned} Q - \Delta H &= H_P - H_R = \sum_P n_i H_i - \sum_R n_i H_i \\ &= \sum_P n_i (\Delta H_f + \Delta H_s)_i - \sum_R n_i (\Delta H_f + \Delta H_s)_i \end{aligned} \quad (1)$$

当在 SI 制下应用式 (1) 时, 确认 n_i 的单位是 kmol, 而 H_i 的单位是 kJ/kmol [其他情况 Q 的单位用 J]。

- 11.82^D 甲烷 (CH_4) 在空气中作当量燃烧时放出或吸收多少热 (kJ/kmol CH_4)? 假定所有反应物和生成物都在 1 bar, 25°C 下进入与离开, 且生成水都为气态。

解 利用题 11.81 式 (1), n_i 可从下式得到:



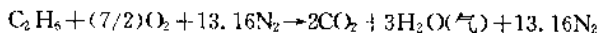
(见题 11.41)。由于在标准状况下进行, 所有 $\Delta H_s = 0$, 另外, 自然分子状态出现的 N_2 和 O_2 的 ΔH_f 也是零。因此, 由参考表 G2,

$$Q = 1(-393510) + 2(-241820) + 0 - 1(-74840) - 0 - 0 = -802310 \text{ kJ/kmol CH}_4$$

因为 $Q < 0$, 反应中放出热量, 因此为放热反应。

- 11.83^D 乙烷 (C_2H_6) 在空气中作当量燃烧时, 放出或吸收多少热 (Btu/lbmole C_2H_6)? 假定所有反应物和生成物都在 14.7 psia, 77°F 下进入和离开, 且生成水都为气态。

解 利用题 11.81 式 (1), 由题 11.16, 化学反应平衡方程式是



由于所有反应物和生成物都在标准状况下进入和离开, 它们的显焓为零。同时稳定元素的生成焓也为零。因此, 从表 2 得标准生成焓, $Q = 2(-169200) + 3(-104000) + 0 - 1(-36400) - 0 - 0 = -614000 \text{ Btu/lbmole C}_2\text{H}_6$, 因为 $Q < 0$, 反应中释放热量。

- 11.84^D 假定生成水为液态, 重解题 11.82。

解 惟一不同是要用到液态水的标准生成焓, 这导致

$$Q = -393510 - 571660 + 74840 = -890330 \text{ kJ/kmol CH}_4$$

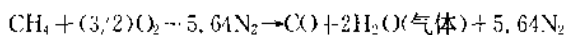
- 11.85^D 假定生成水为液态, 重解题 11.83。

解 惟一不同是要用到液态水的标准生成焓, 这导致

$$Q = -338400 - 368670 + 36400 = -670270 \text{ Btu/lbmole C}_2\text{H}_6$$

- 11.86^D 甲烷在空气中燃烧, 所提供的空气仅使 CO 和水生成, 而不能生成 CO_2 , 所有反应物和生成物均在标准状态下以气态进入与离开, 产生多少热 (kJ/kmol CH_4)?

解 由题 11.50, 当 $n = 1$,

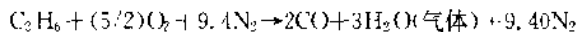


因此,

$$Q = 1(-110520) + 2(-241820) + 0 - 1(-74840) - 0 - 0 = -519320 \text{ kJ/kmol CH}_4$$

- 11.87^D 乙烷气体在空气中燃烧,所提供的空气仅使 CO 和水生成,而不能使 CO₂ 生成,所有反应物和生成物都在 14.70psia, 77°F 下进入与离开,产生多少热(Btu/lb_m mole CH₄)?

解 由题 11.50, 当 $n=2$,

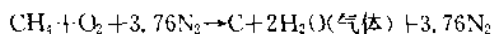


因此,

$$Q = 2(-47520) + 3(-104000) + 0 - 1(-36400) - 0 - 0 = -370640 \text{ Btu/lb}_m$$

- 11.88^D 甲烷在空气中燃烧,所提供的氧仅能氧化氢,问将释放或吸收多少热量(kJ/kmol CH₄)? 所有反应物和生成物均为标准状态下的气体。

解 在此情形下,化学反应平衡方程式为

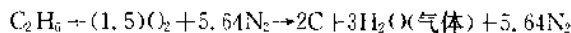


因此,

$$Q = 0 + 2(-241820) + 0 - 1(-74840) - 0 - 0 = -408800 \text{ kJ/kmol CH}_4$$

- 11.89^D 乙烷在空气中燃烧,所提供的氧仅能氧化氢,问将释放或吸收多少热量(Btu/lb_m mole C₂H₆)? 所有反应物和生成物均为标准状态下的气体。

解 化学反应平衡方程式为



解得

$$Q = 0 + 3(-104000) + 0 - 1(-36400) - 0 - 0 = -375600 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole C}_2\text{H}_6$$

- 11.90^D 题 11.82 中,甲烷的当量燃烧产物在多少压强(bar)刚好处于干饱和状态?

解 在 $1+2+7.52=10.52\text{kmol}$ 的混合生成物中有 $2\text{kmol H}_2\text{O}$, 故如果总压强是 P , 水蒸气的分压强是 $(2/10.52)P$, 等于 0.03169bar . 这与 $P=0.167\text{bar}$, 温度为 25°C 下水的饱和蒸汽压相等. 任何压强高于此值时将导致液态水产生.

- 11.91^D 题 11.83 中乙烷的当量燃烧产物在多少压强(psia)下刚好处于干饱和状态?

解 在 $2+3+13.16=18.16\text{lb}_m\text{mole}$ 的混合生成物中有 $3\text{lb}_m\text{mole H}_2\text{O}$, 因此, 若总压强为 P , 水蒸气的分压强是 $(3/18.16)P$, 等于 0.41593psia . 这与 $P=2.52\text{psia}$, 温度为 77°F 下水的饱和蒸汽压相等. 任何压强高于此值时将导致液态水产生.

- 11.92^D 对题 11.82 中甲烷的当量燃烧, 为防止水蒸气的冷凝, 所需的出口流体温度的最小值($^\circ\text{C}$)应是多少?

解 水蒸气的分压强为 $(2/10.52)(1)=0.1901\text{bar}$. 水的饱和蒸汽压为 0.1901bar 所对应的温度是 332.1K , 即 59°C .

- 11.93^D 对题 11.83 中乙烷的当量燃烧, 为防止水蒸气的冷凝, 所需的最低出口流体温度($^\circ\text{F}$)为多少?

解 水蒸气的分压强是 $(3/18.16)(14.7)=2.43\text{psia}$. 水的饱和蒸汽压为 2.43psia 所对应的温度是 133°F .

- 11.94^D 在 1bar , 25°C 下与甲烷作当量燃烧的空气(题 11.82)被预热至 500K , 输出热量增加了多少? (kJ/kmol CH₄)(利用表 G4)

解 已有公式 $Q = H_P - H_R$. H_P 与题 11.82 相比无变化, 但当输入空气增加到 500K , 显焓 H_R 增加了 $2(6088) + 7.52(3921) = 56702\text{kJ/kmol CH}_4$. 因此, 热量增加了负的 56702kJ/kmol CH_4 .

- 11.95 利用空气的平均比热, 重解题 11.94.

解 由于 $9.52\text{kmol 空气/kmol CH}_4$ 在 500K 进入燃烧室, 并在恒压下被冷却至 $25^\circ\text{C}=298\text{K}$,

对每 kmol CH_4 , 空气将要放出热量为

$$m_{c_p} \Delta T = (9.52 \text{ kmol}) (28.97 \text{ kg/kmol}) (1.013 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}) [(298 - 500) \text{ K}] = -56435 \text{ kJ}$$

式中 c_p 是平均温度 400K 下的值。

- 11.96^D 在 14.7 psia 和 77°F 下与乙烷作当量燃烧的空气 (题 11.83) 被预热至 500°F, 输出热量增加了多少 (Btu/lb_m mole C_2H_6)? (使用表 G3)

解 与题 11.83 相比无变化, 但由于输入空气增加到 500K 的显焓, H_R 增加了 $3.50(3061) - 13.16(2964) = 49720 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole } \text{C}_2\text{H}_6$, 这样 $Q = H_P - H_R$ 增加了负的这个量。

- 11.97^D 利用空气的平均比热, 重解题 11.96。

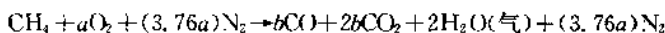
解 每 lb_m mole C_2H_6 , 需 16.66 lb_m mole 空气, 在恒压下将空气从 960°R (500°F) 冷却至 537°R (77°F), 所失去的热量为

$$\begin{aligned} m_{c_p} \Delta T &= (16.66 \text{ lb}_m \text{ mole}) (28.97 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}) \times (0.2443 \text{ Btu/lb}_m \cdot \text{R}) [(960 - 537) \cdot \text{R}] \\ &= 49876 \text{ Btu} \end{aligned}$$

式中 c_p 是表 B1 中两个插值中间的代数平均值。

- 11.98^D 甲烷和空气在 25°C 和大气压下成一定比例进入燃烧室, 在此比例下, 500K 时其燃烧产物中二氧化碳的量将是一氧化碳的两倍 (按体积计), 如所生成的水都为气态, 计算所产生或吸收的热量, 用 kJ/kmol CH_4 表示。

解 令



式中氢的平衡已经完成。

平衡碳: $1 = b + 2b$ 即 $b = 1/3$, 平衡 O: $2a = b + 4b + 2$, 即 $a = 11/6$, 这样, 利用 500K 的显焓为

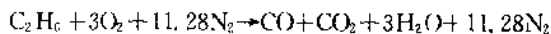
$$\begin{aligned} Q &= (1/3)(-110520 + 5929) + (2/3)(-393510 + 8314) + 2(-241820 + 6920) \\ &\quad + (6.893)(0 + 5921) - 1(-74840 + 0) - 0 - 0 \\ &= -645808 \text{ kJ/kmol } \text{CH}_4 \end{aligned}$$

- 11.99^D 乙烷和空气在 77°F 下进入燃烧室, 燃烧后生成物的温度是 1800°R, 水为蒸汽, 假定空气/燃料比是 13.76 lb_m 空气/lb_m 燃料, 而生成物中一氧化碳和二氧化碳的体积相等, 则每 lb_m mole 乙烷释放出多少热量 (Btu)?

解

$$\begin{aligned} \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} &= \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} \cdot \frac{M_F}{M_A} = (13.76) \left(\frac{30.07}{28.97}\right) \\ &= 14.28 \text{ mol 空气/mol 燃料} = (3 \text{ mol } \text{O}_2 + 11.28 \text{ mol } \text{N}_2) / \text{mol 燃料} \end{aligned}$$

因此,

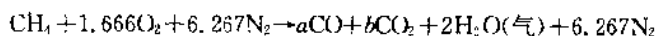


对这一反应, 有

$$\begin{aligned} Q &= 1(-47520 + 9328) + 1(-169200 + 14364) + 3(-104000 + 11175) \\ &\quad + 11.28(0 + 9227) - 1(-36400 + 0) - 0 - 0 \\ &= -331022 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole } \text{C}_2\text{H}_6 \end{aligned}$$

- 11.100^D 甲烷和空气在 25°C、大气压下, 以 7.933 mol 空气/mol 甲烷的比例进入燃烧室, 燃烧后, 生成物 (包括一氧化碳和二氧化碳) 的温度是 500K, 假定生成的水均为气态, 计算所吸收或放出的热量 (以 kJ/kmol CH_4 为单位)。

解 7.933 mol 空气中, 79%, 即 6.267 mol 是 N_2 , 21%, 即 1.666 mol 是 O_2 , 因此,



由碳和氧的平衡得 $a = 2/3, b = 1/3$, 则

$$\begin{aligned} Q &= (2/3)(-110520 + 5929) + (1/3)(-393510 + 8314) + 2(-241820 + 6920) \\ &\quad + 6.266(0 + 5921) - 1(-74840 + 0) - 0 - 0 \\ &= -555985 \text{ kJ/kmol } \text{CH}_4 \end{aligned}$$

- 11.101 乙烷和空气在 77°F 下进入燃烧室, 燃烧后, 生成物温度为 1800°R, 水为蒸汽, 假定

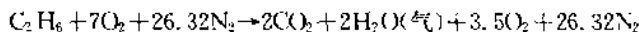
空气/燃料比是 32.10 lb_m 空气/lb_m 燃料, 计算放出的热量(Btu/lb_m mole 乙烷).

解

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} \cdot \frac{M_f}{M_A} = (32.10) \left(\frac{30.07}{28.97}\right)$$

$$= 33.32 \text{ mol 空气/mol 燃料} = (7 \text{ mol O}_2 + 26.32 \text{ mol N}_2) / \text{mol 燃料}$$

因此,



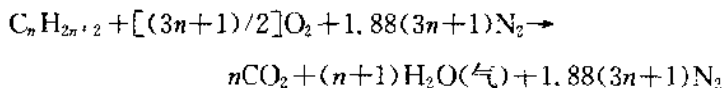
对该反应, 有

$$Q = 2(-169200 + 14364) + 3(-104000 + 11175) + 3.5(0 + 9761)$$

$$+ 26.32(0 + 9227) - 1(-36400) - 0 - 0$$

$$= -274728 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole C}_2\text{H}_6$$

11.102^D 气态烷烃 $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ 和空气在大气压和 25°C 下作当量燃烧反应, 反应方程为



在上述反应中烷烃将放出 975000 kJ/kmol 的热, 而燃烧产物的温度是 1000K, 问是何种烷烃?

解 按通常方法, 有

$$-975000 \text{ kJ} = n(-393510 + 33410) + (n+1)(-241820 + 25980)$$

$$+ 1.88(3n+1)(0 + 21460) - \Delta H_f(\text{烷烃})$$

$$\text{即 } \Delta H_f + (454905)n = 799505$$

若 $n=1$, 则

$$-74840 + (454905) = 380065 \text{ (太小)}$$

若 $n=2$, 则

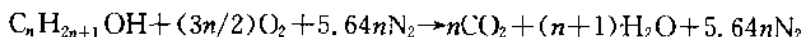
$$-84670 + 909810 = 825140 \text{ (正好接近)}$$

若 $n=3$, 则

$$-103800 + 1364715 = 1260915 \text{ (太大)}$$

最接近的值是 $n=2$, 即烷烃是乙烷.

11.103^D 液态酒精 $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}$ 和当量空气在 14.7 psia 和 77°F 下燃烧, 即按下列方程反应:



酒精燃烧后将放出 415000 Btu/lb_m mole 的热, 而燃烧产物为 1540°F. 问为何种酒精?

解 按通常方法, 有 $-415000 \text{ Btu} = n(-169200 + 16990) + (n+1)(-104000 + 13180)$

$$+ 5.64(0 + 10805) - \Delta H_f(\text{酒精})$$

整理后得

$$\Delta H_f + (243030)n = 385120$$

若 $n=1$, 则

$$-102600 + 243030 = 140430 \text{ (太小)}$$

若 $n=2$, 则

$$-119350 + 486060 = 366710 \text{ (接近)}$$

若 $n=3$, 没有相应的 ΔH_f 值,

若 $n=4$, 则

$$-14290 + 972120 = 829210 \text{ (太大了)}$$

故 $n=2$ 与题意一致, 该酒精是乙醇.

11.104 一燃烧器设计成让煤气与过余 50% 的空气燃烧. 若不烧煤气, 改烧天然气, 要求燃烧器在相同的过余空气比例下仍产生相同的热量, 气体的体积流量和空气的体积流量应发生多大变化? 天然气的体积百分比组分示于表 11-5, 假定天然气的初始

与终了温度均为 25°C , 而生成水为水蒸气。

解 对当量空气下的煤气, 有

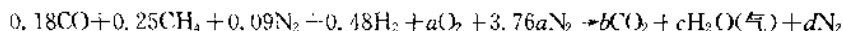


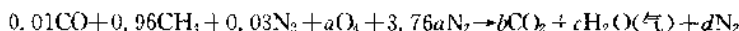
表 11-5

	煤气/(%)	天然气/(%)		煤气/(%)	天然气/(%)
氢气(H_2)	18	0	氧化碳(CO)	18	1
甲烷(CH_4)	25	96	氮气(N_2)	9	3

平衡: $b=0.43, c=0.98, a=0.83$. 由于在标准状态, 任何过剩空气对等号两边的焓的贡献均为零, 故平衡的当量方程将给出实际的输出热, 因此,

$$Q_{\text{煤}} = 0.43(-393510) + 0.98(-241820) + 0 - 0.18(-110520) - 0.25(-74840) \\ - 0 - 0 - 0 - 0 = -367589 \text{ kJ/kmol 煤气}$$

对天然气重复上述过程, 对当量空气, 有



平衡: $b=0.97, c=1.92, a=1.925$, 因此,

$$Q_{\text{天然气}} = 0.97(-393510) + 1.92(-241820) + 0 - 0.01(-110520) - 0.96(-74840) \\ - 0 - 0 - 0 = -773048 \text{ kJ/kmol 天然气}$$

输出相同的热:

$$\frac{\dot{V}_{\text{天然气}}}{\dot{V}_{\text{煤气}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{天然气}}}{\dot{Q}_{\text{煤气}}} = \frac{Q_{\text{煤气}}}{Q_{\text{天然气}}} = \frac{367589}{773048} = 47.6\%$$

包含 50% 的过剩空气, 1 kmol 煤气需要空气 $(1.5)(4.76)(0.83) \text{ kmol}$, 相应的 0.476 kmol 天然气 (没有过剩空气) 需要空气 $(0.476)(4.76)(1.925) \text{ kmol}$. 因此, 空气流的比为

$$\frac{\text{天然气用空气}}{\text{煤气用空气}} = \frac{(0.476)(1.925)}{(1.5)(0.83)} = 73.6\%$$

高热值与低热值

- 11.105 对燃烧反应, 定义: (a) 高热值(HHV)也称为粗卡路里值; (b) 低热值(LHV)也称为净卡路里值. 在(c) 等压燃烧、(d) 等容燃烧情况下给出 HHV 和 LHV 之间的关系.

解 (a) HHV 是任何燃烧反应的生成水以液态出现时, 单位质量燃料所放出的热.

(b) LHV 是任何燃烧反应的生成水以气态出现时, 单位质量燃料所放出的热.

(c) $\text{HHV} - \text{LHV} = \kappa_p (m_w/m_f)$. 式中 m_w/m_f 是所产生的水与燃料的质量比, 而 $\kappa_p = 2441.5 \text{ kJ/kg 燃料} = 1050.0 \text{ Btu/lb}_m \text{ 燃料}$.

(d) $\text{HHV} - \text{LHV} = \kappa_v (m_w/m_f)$, 式中 $\kappa_v = 2304.1 \text{ kJ/kg 燃料} = 990.9 \text{ Btu/lb}_m \text{ 燃料}$.

- 11.106 甲烷在 1 bar, 25°C 下和空气作当量燃烧反应, 生成物在此条件下冷却, 求 HHV 和 LHV.

解



对 $2\text{H}_2\text{O}(\text{气})$:

$$Q = 1(-393510) + 2(-241820) - 1(-74840) = -802310 \text{ kJ/kmol CH}_4 \\ = -50013 \text{ kJ/kg CH}_4 = \text{LHV}$$

$$\text{对 } 2\text{H}_2\text{O}(\text{液}): \quad Q = 1(-393510) + 2(-285830) - 1(-74840) = -890330 \text{ kJ/kmol CH}_4 = \\ -55500 \text{ kJ/kg CH}_4 = \text{HHV}$$

- 11.107 用题 11.106 的数据验证题 11.105(c).

解

$$\text{一方面} \quad \text{HHV} - \text{LHV} = 55500 - 50013 = 5487 \text{ kJ/kg}$$

另一方面, 水/燃料比为

$$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_f} = \frac{(2 \text{ kmol})(18 \text{ kg/kmol})}{(1 \text{ kmol})(16 \text{ kg/kmol})} = 2.25$$

而 $(2441.5)(2.25)=5493\text{kJ/kg}$,两者相当一致。

11.108 什么是绝热火焰温度?

解 对大多数燃烧过程,反应中释放的能量加热反应混合物,因此,离开反应区的生成物的温度高于进入反应区的反应物的温度。热量也由此从反应室流失。如果反应室是完全绝热的,反应中释放的能量将生成物加热至一可达到的最高温度,该温度称为绝热火焰温度。

11.109^D 氢在空气中燃烧的绝热火焰温度是多少? 假定反应物在 1atm, 25°C 进入。

解
$$\text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2 + 1.88\text{N}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{气}) + 1.88\text{N}_2$$

对该反应:

$$Q=0=1(-241820+\Delta H_f(\text{H}_2\text{O})) + 1.88(0+\Delta H_f(\text{N}_2)) - 0 - 0 - 0$$

即 $\Delta H_f(\text{H}_2\text{O}) + 1.88\Delta H_f(\text{N}_2) = 241820\text{kJ/kmol}$, 按表 G4, 在 2500K 下测试。[若所有生成物都假定为 N_2 , $T \approx 2750\text{K}$]

$$98960 + 1.88(74320) = 238682(\text{刚好略小})$$

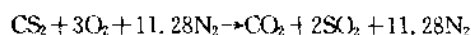
$$\text{在 } 2600\text{K}, \quad 104370 + 1.88(77990) = 250991(\text{稍高一点})$$

经插值:

$$T \approx 2500 + [(241820 - 238682)/(250991 - 238682)](100) = 2525\text{K}$$

11.110^D 二硫化碳 CS_2 气体与空气在 1atm, 77 °F 下作当量燃烧反应, 计算绝热火焰温度。假定二氧化碳没分解。

解 对当量空气, 反应方程为



因此,

$$Q = 0 = 1(-169200 + \Delta H_f(\text{CO}_2)) + 2(-127640 + \Delta H_f(\text{SO}_2)) + 11.28(0 + \Delta H_f(\text{N}_2)) - 1(-46950)$$

$$\text{即} \quad \Delta H_f(\text{CO}_2) + (2)\Delta H_f(\text{SO}_2) + (11.28)\Delta H_f(\text{N}_2) = 377530\text{Btu/lbm mole}$$

现若所有生成物是氮, 将有显焓 $377530/14.28 = 26438\text{Btu/lbm mole}$, 其对应的温度为 3800°R 。由于其他生成物要带走更多的能量, 由表 G3, 按 3600°R 可求得

$$39380 + (2) \times (39230) + (11.28)(24150) = 390252(\text{太高})$$

按 3400°R , 求得

$$36500 + (2)(36210) + (11.28) \times (22430) = 361930(\text{太低})$$

通过线性插值,

$$T \approx 3400 + [(377530 - 361930)/(390252 - 361930)](200) = 3510^\circ\text{R}$$

即 3050°F 。

11.111 题 11.110 中, 分解为零的假定是否与实际一致?

解 从表 H2 在 3500°R 下的数据得, 对反应 $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + (1/2)\text{O}_2$, $\log_{10} K_p$ 等于 -3.092 , 因此 $K_p < 10^{-3}$, 所以分解可以忽略。

11.112^D 二硫化碳(CS_2)与过剩 100% 的空气发生燃烧反应, 其绝热火焰温度是多少(K)?

解 化学反应平衡方程为(参见题 11.110)



对该反应:

$$Q = 0 = 1(-393510 + \Delta H_f(\text{CO}_2)) + 2(-296900 + \Delta H_f(\text{SO}_2)) + 3(\Delta H_f(\text{O}_2)) + 22.56(\Delta H_f(\text{N}_2)) - 1(-109200)$$

$$\text{即} \quad \Delta H_f(\text{CO}_2) + 2\Delta H_f(\text{SO}_2) + 3\Delta H_f(\text{O}_2) + 22.56\Delta H_f(\text{N}_2) = 878110\text{kJ/kmol}$$

在表 G4 中查取符合该方程的温度。可从 1200K 开始[若所有生成物都是氮的话, $T \approx 1280\text{K}$], 得

$$44480 + 90920 + 89310 + 634162 = 858872(\text{太低})$$

对 1250K, 得

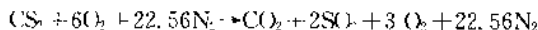
$$47130 + 96540 + 94680 + 672514 = 910864(\text{太高})$$

因此

$$T \approx 1200 + [(878110 - 858872)/(910864 - 858872)](50) = 1219\text{K}$$

11. 113^D 二硫化碳(CS_2)与 100% 过余空气发生燃烧反应, 绝热火焰温度是多少($^{\circ}\text{F}$)?

解 化学反应平衡方程为(参见题 11. 110)



对该反应, 有

$$Q = 0 = 1(-169200 + \Delta H_f(\text{CO}_2)) + 2(-127640 + \Delta H_f(\text{SO}_2)) + 3(\Delta H_f(\text{O}_2)) + 22.56(\Delta H_f(\text{N}_2)) - 1(-46950)$$

即 $\Delta H_f(\text{CO}_2) + 2\Delta H_f(\text{SO}_2) + 3\Delta H_f(\text{O}_2) + 22.56\Delta H_f(\text{N}_2) = 377530 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$

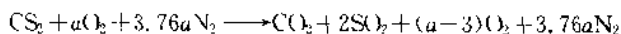
按表 G3 在 $T = 2200^{\circ}\text{R}$ 下作测试[若所有生成物均为氮的话, $T = 2300^{\circ}\text{R}$],

$$19670 + 10160 + 39420 + 279970 = 379220 \text{ (足够接近)}$$

可以求得, 2200°R 将仅比精确温度低 10°R .

11. 114^D 二硫化碳(CS_2)与足够多的空气发生燃烧反应而使绝热火焰温度为 1500K , 所需的过余空气百分比是多少?

解 化学反应平衡方程:



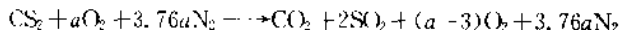
当其生成物为 1500K 时,

$$Q = 1(-393510 + 61710) + 2(-296900 + 62400) + (a-3)(0 + 40610) + 3.76a(0 + 38410) - 1(-109200) = 0$$

解得 $a = 4.396 \text{ kmol}$, 对当量燃烧 $a = 3$, 因此过余的百分比为 $[(4.396 - 3)/3](100) = 46.5\%$.

11. 115^D 二硫化碳(CS_2)与足够多的空气发生燃烧反应, 而使绝热火焰温度为 3000°F , 所需的过余空气的百分比是多少?

解 化学反应平衡方程:



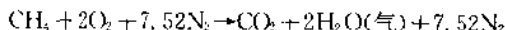
当生成物为 3000°F 时,

$$Q = 1(-169200 + 30780) + 2(-127640 + 30940) + (a-3)(0 + 20090) + 3.76a(0 + 19030) - 1(-46950) = 0$$

解得 $a = 3.762 \text{ lb}_m \text{ mole}$. 对当量燃烧 $a = 3$, 因此, 过余量的百分比为 $[(3.762 - 3)/3](100) = 25.4\%$.

11. 116^D 甲烷和当量空气在绝热的燃烧器中燃烧, 两种物质均在 1 bar , 25°C 下进入, 若分解能忽略, 生成物的温度是多少(K)?

解 题 11. 41 给出



因此,

$$Q = 0 = 1(-393510 + \Delta H_f(\text{CO}_2)) + 2(-241820 + \Delta H_f(\text{H}_2\text{O})) + 7.52(\Delta H_f(\text{N}_2)) - 1(-74840)$$

即 $\sum n_i \Delta H_{f,i} = 802310 \text{ kJ/kmol}$. 若所有生成物都是 N_2 , 则 $10.52\Delta H_f(\text{N}_2) = 802310$, 因此

$$\Delta H_f(\text{N}_2) = 76265 \text{ kJ/kmol, 而 } T \approx 2550 \text{ K.}$$

如 $T = 2500 \text{ K}$,

$$\sum n_i \Delta H_{f,i} = 121930 + 2(98960) + 7.52(74320) = 878736 \text{ (太高)}$$

如 $T = 2400 \text{ K}$,

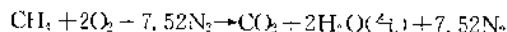
$$\sum = 834353 \text{ (还是太高)}$$

如 $T = 2300 \text{ K}$, $\sum = 790165 \text{ (低)}$. 插值得

$$T \approx 2300 + [(802310 - 790165) / (834353 - 790165)](100) = 2328 \text{ K}$$

11. 117^D 甲烷和当量空气在完全绝热的燃烧器中燃烧, 两种物质均在 14.7 psia , 77°F 下进入, 若分解能忽略, 生成物的温度是多少($^{\circ}\text{F}$)?

解 题 11. 41 给出



因此,

$$Q=0=1(-1692000+\Delta H_f(\text{CO}_2))+2(-104000+\Delta H_f(\text{H}_2\text{O}))+7.52(\Delta H_f(\text{N}_2))-1(-32180)$$

即 $\sum n_i \Delta H_i = 345020 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$, 如果所有生成物是 N_2 , 则

$$\Delta H_f(\text{N}_2) = 345020/10.52 = 32797 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$$

故 $T \approx 4400^\circ\text{R}$.

在 4200°R , $48130+7750+220637-346267$ (略高)

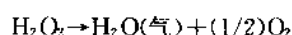
在 4000°R , $45200+72460+207552=325212$ (略低)

插值得

$$T \approx 4400 + [(345020 - 325212)/(346267 - 325212)](200) = 4181^\circ\text{R} = 3721^\circ\text{F}$$

11.118 液态过氧化氢(H_2O_2)会分解. 如为绝热反应, 温度将升到多少度(K)?

解



对该反应有

$$Q=0=1(-241820+\Delta H_f(\text{H}_2\text{O}))+(1/2)(0+\Delta H_f(\text{O}_2))-1(-187500)$$

即

$$\Delta H_f(\text{H}_2\text{O}) + (1/2) \Delta H_f(\text{O}_2) = 54320 \text{ kJ/kmol}$$

由于主要的生成组分是 H_2O , 作为一级近似假定所有生成物是 H_2O , 故

$$\Delta H_f(\text{H}_2\text{O}) = 54320/1.5 = 36213 \text{ kJ/kmol}$$

由此可推算温度大约为 1250K. 由于加热实际生成物中氧消耗的能量少于加热 H_2O 的热, 实际温度将高于 1250K.

按表 G4 中 $T=1300\text{K}$ 测试:

$$38900 + (1/2)(33350) = 55575 \text{ (略高)}$$

用 $T=1250\text{K}$ 测试:

$$36680 + (1/2)(31560) = 52460 \text{ (略低)}$$

因此,

$$T \approx 1250 + [(54320 - 52460)/(55575 - 52460)](50) = 1280\text{K}$$

11.119 一包含 6.54% 体积百分数乙烯的易燃混合物在 300K 干空气中送入气体燃烧器喷口的稳定火焰中, 假定所包含的所有气体都是纯净的, 燃烧是完全的, 散热可忽略, 以 1kmol 乙烯为基准, 计算火焰温度. 表 G2 和 G4 在此不适用. 而应使用下列数据.

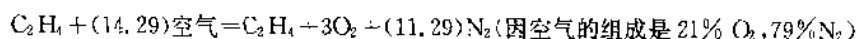
在 300K 的生成焓(kJ/kmol):

$\text{C}_2\text{H}_4(\text{气})$	$\text{CO}_2(\text{气})$	$\text{H}_2\text{O}(\text{气})$
52000	-394000	-242000

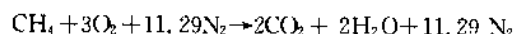
在 1atm 下的摩尔比热容(kJ/kmol·K):

$\text{CO}_2(\text{气})$	$\text{H}_2\text{O}(\text{气})$	$\text{O}_2(\text{气})$	$\text{N}_2(\text{气})$
27	30	26	27

解 由于 $6.54\%/93.46\% = 1/14.29$, 反应混合物可取作



因此



利用上述数据,

$$Q = 2(-394000 + \Delta H_f(\text{CO}_2)) + 2(-242000 + \Delta H_f(\text{H}_2\text{O})) + 11.29(0 + \Delta H_f(\text{N}_2)) - 1(52000) - 0 - 0 = 0$$

即

$$\Delta H_f(\text{CO}_2) + \Delta H_f(\text{H}_2\text{O}) + 5.645\Delta H_f(\text{N}_2) = 662000 \text{ kJ/kmol}$$

而每一个 $\Delta H_i = C_p \Delta T$, 式中 C_p 是表内的摩尔比热容, $\Delta T = T_{\text{火焰}} - (300\text{K})$. 因此,

$$[27 + 30 + (5.645)(37)]\Delta T = 662000$$

由此得 $\Delta T = 3170\text{K}$, 所以 $T_{\text{火焰}} = 3170 + 300 = 3470\text{K}$. [理想化的粗糙假定使结果太高]

等容燃烧

11.120 推导在等容燃烧中计算传热的一般方程。

解 由第一定律, $Q+W=\Delta U$, 如仅有体积力作用, $W=-\int P dV=0$, 因此,

$$Q_v = U_P - U_R = \sum_P n_i U_i - \sum_R n_i U_i$$

式中 n_i 是摩尔数, U_i 是摩尔内能, 用 Q 的下标 v 强调“等容热”。

11.121 将题 11.120 的公式改成用焓表示的公式(焓, 与内能不一样, 附录中将提供其数值), 假定每一种物质均为半完全气体。

解 由定义(当 V_i 是摩尔体积), $U_i = H_i - P_i V_i = (\Delta H_f^\circ + \Delta H_s) - R_u T_i$, 因此公式成为,

$$\begin{aligned} Q_v &= \left[\sum_P n_i (\Delta H_f^\circ + \Delta H_s) - \sum_R n_i (\Delta H_f^\circ + \Delta H_s) \right] + R_u \left[\sum_R n_i T_i - \sum_P n_i T_i \right] \\ &= Q_p + R_u \left[\sum_R n_i T_i - \sum_P n_i T_i \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Q_p 的表达式通过前面习题已熟知, 它将是等压反应中放出的热量。在通常情况下, 所有反应气体具有常温 T_R , 而所有生成气体处在高温 T_P 。

11.122^D 甲烷在空气中刚好经历一次完全燃烧。反应物处在 1bar, 25°C 条件下, 生成物所处温度为 1000K。如果燃烧在一个刚性容器中发生, 将释放多少热量(kJ/kmol CH₄)?

解 将题 11.121 中的式(1), 应用于反应:



因此,

$$\begin{aligned} Q_v &= 1(-393510 + 33410) + 2(-214820 + 25980) + 7.52(0 + 21460) - 1(-174840) - 0 - 0 \\ &= -555561 \text{ kJ/kmol CH}_4 \end{aligned}$$

对这一特殊反应,

$$\sum_R n_i = \sum_P n_i = 10.52 \text{ kmol}$$

故等容的校正项是

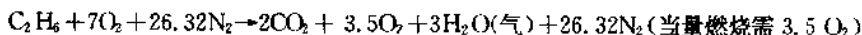
$$R_u (T_R - T_P) \sum n_i = (8.3145)(298.15 - 1000)(10.52) = -61391 \text{ kJ/kmol CH}_4$$

由此得

$$Q_v = -555561 - 61391 = -617042 \text{ kJ/kmol CH}_4$$

11.123^D 乙烷和空气在 14.7psia, 77°F 下在等容容器中反应。如果空气量刚好是当量燃烧的两倍, 温度达到 1500°R, 则释放了多少热量(Btu/lbm C₂H₆)?

解 将题 11.121 公式(1)应用到反应



因此,

$$\begin{aligned} Q_v &= 2(-169200 + 10549) + 3(-104000 + 8293) + 3.5(0 + 7292) + 26.32(0 + 6919) \\ &\quad - 1(-36400) - 0 - 0 = -360393 \text{ Btu/lbmole C}_2\text{H}_6 \end{aligned}$$

附加的温度项等于

$$(1.9859)[(34.32)(537) - (34.82)(1500)] = -67123 \text{ Btu/lbmole C}_2\text{H}_6$$

所以,

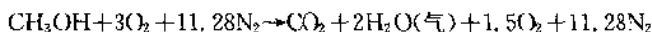
$$Q_v = -360393 - 67123 = -427516 \text{ Btu/lbmole C}_2\text{H}_6$$

最后

$$q_v = Q_v/M = -427516/30.070 = 14220 \text{ Btu/lbm C}_2\text{H}_6$$

11.124 0.02kg 的液态甲醇(CH₃OH)与 100% 的过剩空气在一等容的弹射式量热计中混合并发生爆炸。若甲醇气体在初温 300K 下的压强是 0.1860bar, 量热计的体积需多少升? 假定初始总压强为 1.013bar。

解 对 100% 的过剩空气, 燃烧方程



故

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{\text{质量}} = \left(\frac{A}{F}\right)_{\text{摩尔}} \cdot \frac{M_A}{M_F} = (14.28)(28.97/32.042) = 12.90$$

因此,最初有 0.02kg 甲醇和 $(12.90)(0.02) = 0.2580\text{kg}$ 空气存在。由于甲醇的饱和蒸汽压是 0.1860bar,空气的分压强是 0.827bar,而在 300K, 1bar 下空气的比体积是 $0.861\text{m}^3/\text{kg}$; 因此, 0.2580kg 在 1bar 下占据 $(0.2581)(0.861) = 0.2221\text{m}^3$, 在现在的分压强下占据 $(0.2221)(1/0.827) = 0.268\text{m}^3$ 。由于液态甲醇的体积

$$V = mv = (0.02\text{kg})(0.001274\text{m}^3/\text{kg}) = 2.55 \times 10^{-5}\text{m}^3$$

相比较可忽略,所以所需体积为 0.268m^3 。

- 11.125 对题 11.124 中发生的爆炸,测量得的最终温度是 1800K,对应的最终压强是多少?

解 0.02kg 的液态甲醇是 $0.02/32.042 = 6.24 \times 10^{-4}\text{kmol}$ 。由于 1kmol 燃料产生 15.78kmol 生成物,实际形成 $(6.24 \times 10^{-4})(15.78) = 9.85 \times 10^{-3}\text{kmol}$ 气态生成物,由理想气体状态方程得

$$P = \frac{nR_u T}{V} = \frac{(9.85 \times 10^{-3}\text{kmol})(0.08314\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K})(1800\text{K})}{0.268\text{m}^3} \approx 5.5\text{bar}$$

- 11.126 (a) 食物的卡路里值是怎样定义的? (b) 为什么一些食物的卡路里比所标示的卡路里值少?

解 (a) 通常在一弹射式量热器——刚性容器中放入已称重好的食品,除去空气,引入已知量的氧气,进行燃烧。

(b) 物质(例如谷物)可在纯氧下燃烧,而通过人体消化系统的物质则没有完全在此过程中发生氧化。

第十二章 第二定律在燃烧中的应用

基本概念

- 12.1 (a) 解释热力学势; (b) 阐明下列热力学势的第二定律含义[对一可逆或不可逆过程, 熵不变或增加]: (i) 亥姆霍兹自由能, $F=U-TS$; (ii) 焓, $H=U+PV$; (iii) 吉布斯函数, $G=U-TS+PV$.

解 (a) 可以在(b) (i) 中看到, 可以通过系统自由能作用下的等温膨胀作功, 这可精确地与一机械系统在重力势能作用下的膨胀作功相比拟. 因此, 热力学函数可以认为是势——用来做功的势.

(b) 我们的结论来自克劳修斯不等式(题 3.160), $dS \geq dQ/T = (dU - dW)/T = (dU + PdV)/T$, 即

$$dS - (dU + PdV)/T \geq 0 \quad (1)$$

(i) 在等温下 $dF = dU - TdS \leq -PdV$, 式中不等式关系来自式(1). 因此在等温、等容下 $dF \leq 0$. 从势的角度看, 自由能或者保持常数, 或者减少. 注意对一可逆等温过程 $dF = -PdV = -dW_{\text{exp}}$, 即系统对环境所作的功与它的自由能的减少精确相等. (ii) 对一等熵或等压过程, 式(1)给出 $0 \geq dU + PdV = dU + d(PV) = dH$. 从势的角度, 焓或者保持不变, 或者减少. (iii) 对一等压、等温过程, 式(1)给出

$$0 \geq dU - TdS + PdV = dU - d(TS) + d(PV) = dG$$

就势而言, 吉布斯函数也是或者保持不变, 或者减少.

- 12.2 题 12.1 (b) 的结果对燃烧过程有何意义?

解 若燃烧在一个孤立系统出现, 第二定律要求最后平衡状态必然是一个获得最大熵的状态. 因此, 该状态也必须取得最小自由能, 或最小焓, 或最小吉布斯函数的状态. 它取决于何种参数保持常数.

- 12.3 利用范德霍夫平衡箱推导理想气体反应的平衡常数 K_p 的表达式.

解 考虑由 A、B 两股流体流入一箱子, C、D 两股流体流出该箱.

令 $aA + bB \rightleftharpoons cC + dD$, 为一将 A、B 变为 C、D 的化学反应. 由题 12.1, 对一包含 1 mol 理想气体的等温过程, 有

$$dG_i = d(F_i + PV) = dF_i + PdV + VdP = R_g T(dP/P)$$

在实际压强 P 和参考压强 P° 之间积分, 得 $G_i = G_i^\circ + R_g T \ln(P/P^\circ)$, 将此用于一给定的反应

$$\begin{aligned} G_T(\text{反应物}) &= aG_T^\circ(A) + aR_g T \ln(P_A/P^\circ) + bG_T^\circ(B) + bR_g T \ln(P_B/P^\circ) \\ &= G_T^\circ(\text{反应物}) + R_g T \ln[(P_A/P^\circ)^a (P_B/P^\circ)^b] \\ G_T(\text{生成物}) &= G_T^\circ(\text{生成物}) + R_g T \ln[(P_C/P^\circ)^c (P_D/P^\circ)^d] \end{aligned}$$

现对平衡状态: $G_T(\text{生成物}) = G_T(\text{反应物})$. 因此, 求差值 $\Delta G_T = G_T(\text{生成物}) - G_T(\text{反应物}) = -R_g T \ln K_p$, 得

$$K_p = \frac{(P_C/P^\circ)^c (P_D/P^\circ)^d}{(P_A/P^\circ)^a (P_B/P^\circ)^b} \quad (1)$$

由于统一选择 $P^\circ = 1 \text{ atm}$, 通常在式(1)中消去 P° , 而认为 P_A 等以 atm 为单位.

- 12.4 题 12.3 结果的预测价值是什么?

解 由于在平衡混合物中, 分压强与摩尔分数成正比, 方程 $\Delta G_T = -R_g T \ln K_p$, 可改写成

$$\frac{x_C^c x_D^d}{x_A^a x_B^b} P^{\Delta n} = \exp(-\Delta G_T / R_g T)$$

式中 $\Delta n = (c+d) - (a+b)$. 该式表示生成物对反应物的平衡比例取决于总压强和反应温度, 以及在标准条件下的吉布斯函数的变化.

- 12.5^D 用 400K, 在下列状态下蒸汽表上的数据证明一纯物质发生相变时, 其吉布斯函数不

变。(a) 饱和液体;(b) 饱和蒸汽;(c) 干度为 50% 的混合物。

解

(a) 对单位质量,

$$g_f - u_f - Ts_f + Pv_f = 532.6 - (400)(1.605) + (244.5 \text{ kPa})(0.001067 \text{ m}^3/\text{kg}) = -109.1 \text{ kJ/kg}$$

(b) 对单位质量, $g_g = h_g - Ts_g = 2716 - (400)(7.058) = -107 \text{ kJ/kg}$

(c) 对单位质量, $h_{\text{混合}} = 1624 \text{ kJ/kg}$; $s_{\text{混合}} = 4.332 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; 因此,

$$K_{\text{混合}} = h_{\text{混合}} - Ts_{\text{混合}} = 1624 - (400)(4.332) = -109 \text{ kJ/kg}$$

12.6^D 用 500 psia, 在下列状态下蒸汽表上的数据证明一纯物质发生相变时, 其吉布斯函数不变。(a) 饱和液体;(b) 饱和蒸汽;(c) 干度为 50% 的混合物。

解 由于表 A3 没有给出内能, 利用 $g = h - Ts$ 关系式。

(a) $g_f = h_f - Ts_f = 449.5 - (467.0 + 459.7)(0.649) = -151.0 \text{ Btu/lbm}$

(b) $g_g = h_g - Ts_g = 1235 - (926.7)(1.464) = -152 \text{ Btu/lbm}$

(c) $g_{\text{混合}} = h_{\text{混合}} - Ts_{\text{混合}} = 827 - (926.7)(1.057) = -153 \text{ Btu/lbm}$

12.7 参考题 12.3, 对在 2500 K 和 1 atm 下的反应, $\text{H}_2\text{O}(\text{气}) \rightarrow \text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2$, 计算 $\ln K_p$ 或 $-\Delta G_T^\circ / R_u T$ 。假定在 $T = 2500 \text{ K}$ 下有下列数据: $S_T^\circ(\text{H}_2) = 196.125 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$, $S_T^\circ(\text{O}_2) = 277.207 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$, $S_T^\circ(\text{H}_2\text{O}) = 267.286 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$, $\bar{C}_p(\text{H}_2) = 15.88 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

解 对单位摩尔物质, $G_T = H_T - Ts_T = \Delta H_f^\circ + \Delta H_{ST} - Ts_T$, 因此,

$$\begin{aligned} \Delta G_T^\circ &= \{1[0 + 1(2.016)(15.88)(2500 - 298) - (2500)(196.125)] \\ &\quad + (1/2)[0 + 78370 - (2500)(277.207)]\} \\ &\quad - \{1[-241820 + 98960 - (2500)(267.286)]\} \\ &= 106433 \text{ kJ/kmol} \end{aligned}$$

因此,

$$\ln K_p = -(106433 \text{ kJ/kmol}) / (8.3143 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K})(2500 \text{ K}) = -5.121$$

即 $\log_{10} K_p = -5.121/2.302 = -2.224$ (见表 H1)。注意氢的摩尔显焓是按 $M\bar{C}_p\Delta T$ 计算的。

单质的分解

12.8^D 在什么温度下(K), 氧分子将分解 10%? 假定总压强为 (a) 0.1 atm; (b) 1 atm。

解 对平衡方程 $\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}$, $K_p = P_{\text{O}}^2 / P_{\text{O}_2} = (x_{\text{O}}^2 / x_{\text{O}_2})P$ 。“分解 10%”意味着在平衡态混合物中摩尔分数为 $x_{\text{O}} = 0.1$, $x_{\text{O}_2} = 0.9$, 因此, $K_p = (1/90)P$ 。

(a) $K_p = (1/90)(0.1) = 1.11 \times 10^{-3}$; $\log K_p = -2.954$ 。从表 H1 查询得 $T < 2700 \text{ K}$, 应用线性插值,

$$T \approx 2600 + [(2.954 - 3.272) / (2.892 - 3.272)](100) = 2684 \text{ K}$$

(实际上线性插值不够正确, 见题 12.35)。

(b) $K_p = (1/90)(1) = 0.0111$, $\log_{10} K_p = -1.954$, $T < 3000 \text{ K}$

12.9^D 在什么温度下(°F), 氮分子将分解 5%? 假定总压为 1 psia。

解 对 $\text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{N}$, $K_p = P_{\text{N}}^2 / P_{\text{N}_2} = (x_{\text{N}}^2 / x_{\text{N}_2})P = (0.05^2 / 0.95)(1/1.47) = 1.79 \times 10^{-4}$, $\log_{10} K_p = -3.747$ 。这里与题 12.8 一样, 分解的百分数是基于最后混合物的组分, 而不是初始 N_2 的量, 查询表 H2 得, 将要求温度高于 6000°R 。

12.10^D 在什么压强(bar)下, 氧分子将分解 10%? 假定温度为 (a) 2500 K; (b) 3000 K。用反应程度 ϵ 求解。

解 反应程度方程 $\text{O}_2 = (1 - \epsilon)\text{O}_2 + \epsilon\text{O}_2$ 。假定仅有 ϵ -份额分解, $\text{O}_2 \rightleftharpoons (1 - \epsilon)\text{O}_2 + 2\epsilon\text{O}$, 因此, 摩尔分数为 $x_{\text{O}_2} = (1 - \epsilon) / (1 + \epsilon)$ 以及 $x_{\text{O}} = 2\epsilon / (1 + \epsilon)$, 得到

$$K_p = \frac{x_{\text{O}}^2}{x_{\text{O}_2}} P = \frac{4\epsilon^2}{1 - \epsilon^2} P$$

“分解 10%”意味着反应进行 10% 就完成 (即 $\epsilon = 0.10$), 或者意味着 $2\epsilon / (1 + \epsilon) = 0.10$, 在此情况下

和题 12.8 一样, $K_p = (1/90)P$, 由此作下列分析:

(a) 在 2500K, $\log_{10} K_p = -3.684$, 即 $K_p = 2.070 \times 10^{-4}$, 则 $P = 90K_p = 0.0186 \text{ atm} = 0.0189 \text{ bar}$.

(b) 在 3000K, $\log_{10} K_p = -1.898$, 即 $K_p = 1.265 \times 10^{-2}$, 则 $P = 90K_p = 1.138 \text{ atm} = 1.153 \text{ bar}$.

12.11^D 在什么压强(psia)下, 氧分子将在 4500°R 下分解 5%? 利用反应程度 ϵ 解题.

解 如题 12.10 推导的, $K_p = [4\epsilon^2 / (1-\epsilon^2)]P$, 按照相同的解释(5%是基于产物得出的), 则 $2\epsilon / (1-\epsilon) = 0.05$, 即 $\epsilon = 0.0256$. 根据这一数据 $K_p = 2.632 \times 10^{-3} P$, 现在 4500°R, $\log_{10} K_p = -3.684$, 即 $K_p = 2.07 \times 10^{-4}$, 因此, $P = (2.07 \times 10^{-4}) / (2.632 \times 10^{-3}) = 0.0787 \text{ atm} = 1.16 \text{ psia}$.

12.12 在 2500K 下分解反应 $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2$ 的平衡常数为 K_p , 写出在 2500K 下, 下列反应的平衡常数: (a) $r\text{H}_2\text{O} \rightarrow r\text{H}_2 + (r/2)\text{O}_2$; (b) $\text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$.

解 (a) K_p^r . (b) $1/K_p$.

12.13^D 在 1atm 和 2500K 下, 一容器中多少百分比的蒸汽将分解? 假定

$$K_p = P_{\text{H}_2} \sqrt{P_{\text{O}_2}} / P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.00597$$

利用生成物的摩尔组分取得结果.

解 令 $\text{H}_2\text{O} = x\text{H}_2 + y\text{O}_2 + z\text{H}_2\text{O}$, 由 H-和 O-的平衡得 $z = 1-x$, $y = x/2$, 因此 $\text{H}_2\text{O} = x\text{H}_2 + (x/2)\text{O}_2 + (1-x)\text{H}_2\text{O}$, 用摩尔数表示, 当 $P=1$,

$$K_p = \frac{n_{\text{H}_2} \sqrt{n_{\text{O}_2}}}{n_{\text{H}_2\text{O}}} \left(\frac{P}{\sum} \right)^{\Delta n} = \frac{x \sqrt{x/2}}{1-x} \left[\frac{1}{1+(x/2)} \right]^{1+(1/2)-1} = \frac{x^{3/2}}{(1-x)(2+x)^{1/2}} \equiv f(x)$$

用尝试法解 $f(x) = 0.00597$.

x	0.1	0.05	0.04	0.041	0.0406
$f(x)$	0.0243	0.0082	0.00583	0.00606	0.00597

因此, 蒸汽分解的百分数为 $1-z=x=4.06\%$.

12.14^D 在 14.7psia 和 5000°R 下, 一容器中多少百分比的蒸汽将分解? 假定

$$K_p = P_{\text{H}_2} \sqrt{P_{\text{O}_2}} / P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.02014$$

利用生成物的摩尔组分取得结果.

解 因为 14.7psia=1atm, 题 12.13 的分析可应用于此, 解方程 $f(x) = 0.02014$.

x	0.2	0.15	0.1	0.09	0.089	0.0889
$f(x)$	0.0754	0.0466	0.0242	0.0205	0.02016	0.02013

因此蒸汽分解的百分数为 $x=8.89\%$.

12.15 用反应程度 ϵ , 重解题 12.13.

解 令 $\text{H}_2\text{O} = (1-\epsilon)\text{H}_2\text{O} + \epsilon\text{H}_2\text{O} = (1-\epsilon)\text{H}_2\text{O} + \epsilon\text{H}_2 + (\epsilon/2)\text{O}_2$

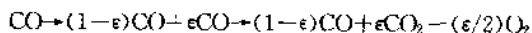
这和题 12.13 的平衡式完全一致, 只是用 ϵ 代替 x , 因此, 蒸汽分解的百分数是 $\epsilon=4.06\%$.

12.16 在 1.013bar(1atm)和 2500K, 对反应 $\text{CO} + (1/2)\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ 的平衡常数是

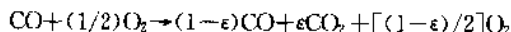
$$K_p = P_{\text{CO}_2} / [P_{\text{CO}} \sqrt{P_{\text{O}_2}}] = 27.54$$

求平衡混合物的体积百分组分.

解 利用反应程度参数, 令



加 $(1/2)\text{O}_2$ 到方程两边得



右边的摩尔分数给出分压强 ($P=1$): $P_{\text{CO}} = 2(1-\epsilon)/(3-\epsilon)$, $P_{\text{CO}_2} = 2\epsilon/(3-\epsilon)$ 和 $P_{\text{O}_2} = (1-\epsilon)/(3-\epsilon)$, 将这些结果插入表达式

$$K_p = \frac{\epsilon(3-\epsilon)^{1/2}}{(1-\epsilon)^{3/2}} \quad \text{或} \quad K_p^2 = \frac{\epsilon^2(3-\epsilon)}{(1-\epsilon)^3} \equiv f(\epsilon)$$

用尝试法求解方程式 $f(\epsilon) = (27.54)^2 = 758.45$.

ϵ	0.75	0.85	0.9	0.875	0.871	0.8713
$f(\epsilon)$	81	460	1701	833	752	758.1

因此, $\epsilon \approx 0.8713$, 混合物是 $0.1287\text{CO} + 0.8713\text{CO}_2 + 0.0644\text{O}_2$.

- 12.17** 如果反应发生在空气中, 即如发生反应 $\text{CO} + (1/2)\text{O}_2 + 1.88\text{N}_2$, 题 12.16 所确定的平衡态将怎样改变? 应用相同的压强、温度和平衡常数.

解 在前面推导的方程两边各加上 1.88N_2 , 这就将混合物的总摩尔数由 $(3-\epsilon)/2$ 改变为 $(3-\epsilon)/2 + 1.88 = (6.67-\epsilon)/2$. 因此, 在上题的分析中用 6.76 代替 3, 用尝试法解方程 $g(\epsilon) = \epsilon^2(6.76-\epsilon)/(1-\epsilon)^3 = 758.45$.

ϵ	0.8	0.82	0.84	0.825	0.826	0.8255
$g(\epsilon)$	477	685	1020	753.7	768.5	761.1

解得 $\epsilon = 0.8253$, 而平衡混合物的百分成分为 $0.1747\text{CO} + 0.8253\text{CO}_2 + 0.0874\text{O}_2 + 1.88\text{N}_2$.

- 12.18** 在题 12.16 反应过程前, 加入 $5\text{mol N}_2/\text{mol O}_2$. 则关于 ϵ 的方程式有什么变化?

解 由于反应中有 $(1/2)\text{mol O}_2$, 需要加入 2.5mol N_2 . 因此 $(\sum n)_* = (\sum n)_e + 2.5 = (3-\epsilon)/2 + 2.5 = (8-\epsilon)/2$, 新方程为

$$\epsilon^2(8-\epsilon)(1-\epsilon)^3 = 758.45$$

- 12.19** 考虑反应 $\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + (1/2)\text{O}_2$, 对此

$$K_p = P_{\text{CO}} \sqrt{P_{\text{O}_2}} / P_{\text{CO}_2}$$

如果反应发生在 1atm , 2500K 下, 要使其刚好包含 0.75mol CO_2 , 需在混合物中加入多少氮?

解 令 $\text{CO} + (1/2)\text{O}_2 + a\text{N}_2 \rightarrow (1-\epsilon)\text{CO} + \epsilon\text{CO}_2 + [(1-\epsilon)/2]\text{O}_2 + a\text{N}_2$, 从方程式右边各自的摩尔分数计算分压强, 得 $P=1$ 时,

$$K_p = \frac{(1-\epsilon)^{3/2}}{\epsilon(2a+3-\epsilon)^{1/2}} \quad (1)$$

由题 12.16, $K_p = 1/27.54$, 解得 $\epsilon = 0.75$, 因此, 从式(1)求得 $a = 9.41\text{mol N}_2$.

- 12.20** (a) 对在大气压下的反应 $\text{A}_2 \rightleftharpoons 2\text{A}$, 推导反应程度 ϵ 在一级近似下的表达式; $\epsilon = (1/2)(K_p)^{1/2}$. (b) 解释为什么题 12.19 中氮的可能的分解能忽略. (c) 这一忽略将导致哪些轻微的误差?

解 (a) 令 $\text{A}_2 = (1-\epsilon)\text{A}_2 + \epsilon\text{A}_2 \rightleftharpoons (1-\epsilon)\text{A}_2 + 2\epsilon\text{A}$

然后, 由于 $P=1$, $P_A = 2\epsilon/(1+\epsilon)$, $P_{\text{A}_2} = (1-\epsilon)/(1+\epsilon)$, $K_p = P_A^2 / P_{\text{A}_2} = 4\epsilon^2 / (1-\epsilon^2)$, 该式可转换成

$$\epsilon = \sqrt{K_p} / \sqrt{4+K_p}$$

因 $K_p \ll 4$,

$$\epsilon \approx \frac{1}{2} \sqrt{K_p}$$

(b) 在 2500K 下, $\text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{N}$, 故

$$K_p = 8.511 \times 10^{-14}, \quad (1/2)(K_p)^{1/2} = \epsilon = 1.46 \times 10^{-7}$$

氮几乎没有分解.

(c) 如果一小部分氮原子与任何氧结合, 所假定的混合物的平衡组分将被改变.

- 12.21** 下列在 1atm 压强下求得的体积百分数据, 来自 NASA Langley 出版的有关氮的热力学性质, (i) $T=500\text{K}$, $\text{NH}_3=0.0847$, $\text{H}_2=0.6865$, $\text{N}_2=0.2288$; (ii) $T=1000\text{K}$, $\text{NH}_3=0.0002$, $\text{H}_2=0.7499$, $\text{N}_2=0.2499$. 计算反应 $\text{NH}_3 \rightarrow (1/2)\text{N}_2 + (3/2)\text{H}_2$, 在 (a) 500K 和 (b) 1000K 下的平衡常数 K_p .

解 令 $\text{NH}_3 = (1-\epsilon)\text{NH}_3 + \epsilon\text{NH}_3 = (1-\epsilon)\text{NH}_3 + (\epsilon/2)\text{N}_2 + (3\epsilon/2)\text{H}_2$

生成物的总摩尔数是 $1+\epsilon$, 因此, 摩尔分数是

$$x_{\text{NH}_3} = (1-\epsilon)/(1+\epsilon), \quad x_{\text{N}_2} = \epsilon/2(1+\epsilon), \quad x_{\text{H}_2} = 3\epsilon/2(1+\epsilon)$$

在 500K, NH_3 体积分数 $(1-\epsilon)/(1+\epsilon) = 0.0847$, 即 $\epsilon = 0.8438$; N_2 的体积分数 $\epsilon/2(1+\epsilon) = 0.2288$, 即 $\epsilon = 0.8437$; H_2 的体积分数 $3\epsilon/2(1+\epsilon) = 0.6865$, 即 $\epsilon = 0.8439$. 输入数据为常数[不总是这样], 求得 $\epsilon = 0.8438 \pm 0.0001$, 用同样方法, 在 1000K, 求得 $\epsilon = 0.9994 \pm 0.0002$, 基本反应方程式为 $\text{NH}_3 \rightarrow (1/2)\text{N}_2 + (3/2)\text{H}_2$, 因此 ($P=1$)

$$K_p = \frac{x_{\text{N}_2}^{1/2} x_{\text{H}_2}^{3/2}}{x_{\text{NH}_3}} = \frac{3^{3/2}}{4} \frac{\epsilon^2}{1-\epsilon^2} = 1.299 \frac{\epsilon^2}{1-\epsilon^2}$$

所以 (a)

$$K_p = (1.299)(0.7120)/0.2880 = 3.211$$

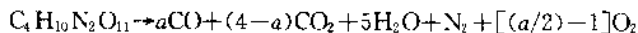
(b)

$$K_p = (1.299)(0.9988)/0.0012 = 1082$$

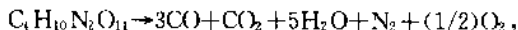
- 12.22** $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_{11}$ 气体离开一封闭容器后, 自然分解且部分氧化. 当它被加热到一定温度 (压强仍为 1atm), 形成的一氧化碳是二氧化碳的三倍. 假定为理想气体, 求温度 (K), 忽略任何可能的氧和水蒸气的分解.

解 令 $\text{C}_4\text{H}_{10}\text{N}_2\text{O}_{11} \rightarrow a\text{CO} + b\text{CO}_2 + c\text{H}_2\text{O} + d\text{N}_2 + e\text{O}_2$

则 $4=a+b$, $10=2c$, 故 $c=5$; $2=2d$, 故 $d=1$, $11=a+2b+c+2e=a+2b+5+2e$, 故 $e=3-(a/2)-b$, 而 $b=4-a$, 故 $e=(a/2)-1$. 因此,



假定 CO 是 CO_2 的三倍, 则 $a=3(4-a)$, 即 $a=3$, 因此,



对该反应, 在 1atm 下的平衡常数为

$$K_p = x_{\text{CO}} \sqrt{x_{\text{O}_2}} / x_{\text{CO}_2} = (3/10.5)(\sqrt{1/21})/(1/10.5) = 0.6547$$

因为 $\log_{10} K_p = -0.184$, 所以, 表 H1 显示 $T > 3000\text{K}$. [考虑水蒸气分解的更接近实际的计算, 将由题 12.34 给出.]

- 12.23** 在一热力学练习中, 求得在 2000K 下, 对 $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ 反应有 $\log_{10} K_p = 10.353$; 对 $\text{C} + (1/2)\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ 反应有 $\log_{10} K_p = 7.469$, 请根据这些数据推导在 2000K 下, 反应 $\text{CO} + (1/2)\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ 的 K_p .

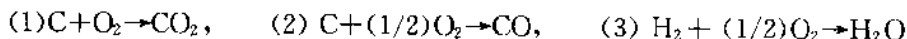
解 反应相加意味着平衡常数相乘, 也就是它们的对数相加. $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ 和 $\text{CO} \rightarrow \text{C} + (1/2)\text{O}_2$ 两个反应的和也就是 $\text{C} + \text{O}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C} + (1/2)\text{O}_2$, 化简后即 $\text{CO} + (1/2)\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$, 此反应的 $\log_{10} K_p = 10.353 + (-7.469) = 2.884$.

- 12.24** 已知在 4500°R 下, 对反应 $(1/2)\text{O}_2 + (1/2)\text{N}_2 \rightarrow \text{NO}$, 有 $\log_{10} K_p = -1.227$, 对反应 $\text{O}_2 + (1/2)\text{N}_2 \rightarrow \text{NO}_2$, 有 $\log_{10} K_p = -3.979$, 则对 4500°R 下, 反应 $\text{NO} + (1/2)\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2$, 平衡常数是多少?

解 $\log_{10} K_p$ 是一可叠加参数. 第三个反应是第二个反应与第一个反应的逆反应之和. 所以

$$\log_{10} K_p = (-3.979) + (+1.227) = -2.752$$

- 12.25** 如 K_{p_1} , K_{p_2} , K_{p_3} , 分别是以下三个反应的平衡常数:

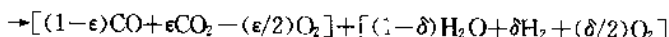


给出反应 (4) $\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$ 的平衡常数表达式.

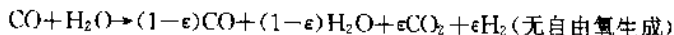
解 因为 (4) + (1) = (3) + (2), 所以 $K_{p_4} K_{p_1} = K_{p_3} K_{p_2}$, 即 $K_{p_4} = K_{p_3} K_{p_2} / K_{p_1}$.

- 12.26** 估计下列说法的正确性: 在 1atm 和 1000K 下的绝热反应中, 少于 10% 的等克分子的 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ (气) 混合物反应生成等克分子的 $\text{CO}_2 + \text{H}_2$.

解 先写出 $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow (1-\epsilon)\text{CO} + \epsilon\text{CO} + (1-\delta)\text{H}_2\text{O} + \delta\text{H}_2\text{O}$



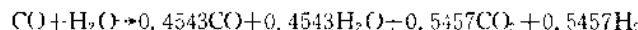
但若 CO_2 和 H_2 是等克分子的, 则 $\epsilon = \delta$, 故



因此, 当 $P=1$ 时,

$$K_p = \frac{x_{\text{CO}} x_{\text{H}_2}}{x_{\text{CO}_2} x_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{(\epsilon/2)(\epsilon/2)}{[(1-\epsilon)/2][(1-\epsilon)/2]} = \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon}\right)^2$$

由表 H1 (对逆反应), $K_p = 1.442$, 解得 $\epsilon = 0.5457$, 所以



故该说法不对, 有将近 55% 的 CO 和 H₂O 发生反应。

12.27 证明题 12.26 中暗指的假设——在平衡混合物中仅有气态 H₂O 存在。

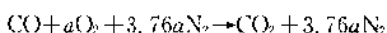
解 由于温度为 1000K, 即高于 H₂O 的临界温度 647K, H₂O 必须为气态。

12.28^D 一氧化碳与比当量燃烧少 10% 的空气发生反应, 生成物在 1atm, 2500K 下离开。在 2500K,

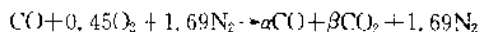
$$K_p = P_{\text{CO}_2} / P_{\text{CO}} \sqrt{P_{\text{O}_2}} = 27.54$$

试给出生成物气体的体积百分成分分析。

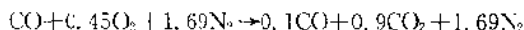
解 首先考虑当量燃烧情况。若



则 $a = 1/2$, 因此, 对 90% 的空气, $a = 0.45$, 所以



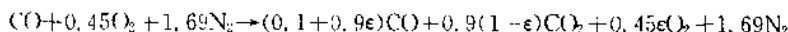
平衡后得



方程式右边的摩尔分数也是体积分数: CO, 3.7%; CO₂, 33.5%; N₂, 62.8%。该过程不能让所生成的 CO₂ 部分或全部分解, 令

$$\text{CO}_2 = (1-\epsilon)\text{CO}_2 + \epsilon\text{CO} = (1-\epsilon)\text{CO}_2 + \epsilon\text{CO} + (\epsilon/2)\text{O}_2$$

将此代入实际反应方程, 得



因为 $P = 1$, 上式右边的摩尔分数, 可取代 K_p 表达式中的分压强, 从而得到

$$\frac{0.9(1-\epsilon)}{0.1 + 0.9\epsilon} \sqrt{\frac{2.69 + 0.45\epsilon}{0.45\epsilon}} = 27.54$$

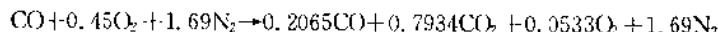
即

$$2.053 \cdot \frac{1-\epsilon}{1+9\epsilon} \sqrt{0.45 + \frac{2.69}{\epsilon}} = f(\epsilon)$$

可用试探法求解该方程:

ϵ	0.1	0.15	0.13	0.12	0.118	0.1185
$f(\epsilon)$	2.477	1.551	1.843	2.023	2.062	2.052

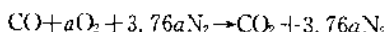
因此, $\epsilon = 0.1185$, 实际方程为



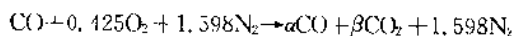
所生成的总摩尔数 (或总体积数) 为 2.7434, 因此, 生成物的体积百分成分分析为 CO, 7.5%; CO₂, 28.9%; O₂, 1.9%; N₂, 61.6%。

12.29^D 一氧化碳与比当量燃烧少 15% 的空气发生反应, 生成物在 1atm, 500°F 下离开。在 5000°F, $K_p = P_{\text{CO}_2} / P_{\text{CO}} \sqrt{P_{\text{O}_2}} = 7.345$, 试给出生成气体的体积百分成分分析。

解 首先考虑当量燃烧情况。若



则 $a = 1/2$, 因此, 对 85% 空气, $a = 0.425$, 所以



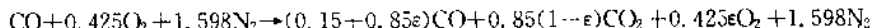
考虑平衡后得



方程式右边的摩尔分数也是体积分数: CO, 5.8%; CO₂, 32.7%; N₂, 61.5%。该过程不能让所生成的 CO₂ 部分或全部分解, 令

$$\text{CO}_2 = (1-\epsilon)\text{CO}_2 + \epsilon\text{CO} = (1-\epsilon)\text{CO}_2 + \epsilon\text{CO} + (\epsilon/2)\text{O}_2$$

将此代入实际反应方程得



因为 $P=1$, 上式右边的摩尔分数可取代 K_p 表达式中的分压强, 从而得

$$\frac{0.85}{0.15} \frac{1 - \epsilon}{1 + 5.667\epsilon} \sqrt{\frac{2.598 + 0.425\epsilon}{0.425\epsilon}} = 7.345$$

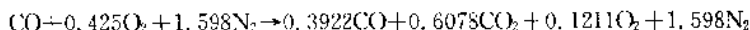
即

$$1.2962 = \frac{1 - \epsilon}{1 + 5.667\epsilon} \sqrt{1 + \frac{6.1129}{\epsilon}} \equiv f(\epsilon)$$

通过尝试法解得

ϵ	0.2	0.15	0.25	0.3	0.29	0.286	2.285	0.2851
$f(\epsilon)$	2.0583	2.9689	1.5657	1.1987	1.2621	1.2887	1.2955	1.2948

因此, $\epsilon=0.2849$, 实际方程为

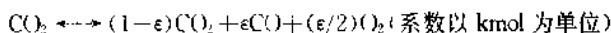


所生成的总摩尔数(或总体积数)为 2.7191, 因此, 生成物的体积百分成分分析为 CO , 14.41%; CO_2 , 22.4%; O_2 , 4.5%; N_2 , 58.8%。

分解的热效应

- 12.30** 1kmol 二氧化碳气体从 1atm, 298K 加热到 10atm, 3000K, 如果分解(a) 被忽略, (b) 被考虑, 则分别需要多少热(MJ)?

解 令反应方程为



(a) 如果忽略分解 $\epsilon=0$,

$$\begin{aligned} Q &= 1(\Delta H_f + \Delta H_r)_{\text{CO}_2, 3000\text{K}} - 1(\Delta H_f + \Delta H_r)_{\text{CO}_2, 298\text{K}} \\ &= 1(-393510 + 152860) - 1(-393510 + 0) \\ &= 152860\text{kJ} = 152.86\text{MJ} \end{aligned}$$

注意生成焓相互抵消, 所需的热量仅为显焓差, 这一计算与 11 章十分相似。

(b) 考虑分解, $\epsilon > 0$,

$$\begin{aligned} Q &= (1 - \epsilon)(-393510 + 152860) + \epsilon(-110520 + 93540) + (\epsilon/2)(0 + 98100) - 1(-393510 + 0) \\ &= (152860 + 272720\epsilon)\text{kJ} \end{aligned}$$

此为第一定律分析, 对于分解 $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + (1/2)\text{O}_2$, 假定发生在 10atm 和 3000K,

$$K_p = [x_{\text{CO}} x_{\text{O}_2}^{1/2} / x_{\text{CO}_2}] P^{1+(1/2)-1} = [x_{\text{CO}} \sqrt{x_{\text{O}_2}} / x_{\text{CO}_2}] \sqrt{10} = 10^{-0.485} = 0.3273$$

(由表 H1 得)将前述反应方程右边的摩尔分数代入, 可得到下列有关 ϵ 的方程

$$f(\epsilon) = \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2 (2 + \epsilon)} = \frac{(0.3273)^2}{10} = 0.01072$$

由试探法解得

$$\begin{aligned} f(0.5) &= 0.20 (\text{太大}) & f(0.1) &= 5.88 \times 10^{-4} (\text{太小}) & f(0.2) &= 0.00568 (\text{太小}) \\ f(0.3) &= 0.02395 (\text{太大}), & f(0.24) &= 0.01068 (\text{正好}) \end{aligned}$$

所以, $\epsilon=0.24\text{kmol}$, 求得

$$Q = (152860) + (272720)(0.24) = 218310\text{kJ} = 218.31\text{MJ}$$

- 12.31** 固体碳在空气中燃烧, 输入温度为 25°C, 燃烧产物是一氧化碳、二氧化碳、氧和氮。如果整个过程在大气压下进行, 求绝热火焰温度(K), 假定为当量空气。

解 对当量空气,



对当量空气, 现允许有分解, 即



对绝热燃烧,

$$Q = 0 = (1 - \epsilon)(-393510 + \Delta H_{\text{CO}_2}) + \epsilon(-110520 + \Delta H_{\text{CO}})$$

$$-(\epsilon/2)(0 + \Delta H_{f,O_2}) + 3.76(0 - \Delta H_{f,N_2}) - 0 - 0 - 0$$

整理成求 ϵ 的表达式:

$$\epsilon = \frac{393510 - \Delta H_{f,CO} - (3.76)\Delta H_{f,N_2}}{282990 - \Delta H_{f,CO_2} + \Delta H_{f,H_2O} + (1/2)\Delta H_{f,O_2}} \quad (1)$$

另一方面, O_2 的摩尔分数为 $\epsilon/(9.52 + \epsilon)P$; CO 为 $2\epsilon/(9.52 + \epsilon)P$; CO_2 为 $2(1 - \epsilon)/(9.52 + \epsilon)P$. 分解的平衡常数为 ($P=1$)

$$K_p = \frac{P_{CO} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{CO_2}} = \frac{\epsilon^{1/2}}{(1 - \epsilon) \sqrt{9.52 + \epsilon}} \quad (2)$$

火焰温度的算法如下所述, 先预设一温度值, 求得对应的显焓代入方程(1), 可计算 ϵ , 然后用式(2)求得 K_p , 计算求得的 K_p (更精确的值, 可用它的对数值) 和在表 H1 中给出的值作对比. 根据结果再选择另一个新的温度预测值, 重复上述过程直至两个 K_p 一致, 对应于该 K_p 值的温度, 即为火焰温度. 预测 $T=2300K$.

$$\epsilon = \frac{393510 - 121930 - 279413}{282990 - 121930 + 75020 - 39185} = -0.029$$

十分明显, 这是一个不可能的结果, 预测 $T=3000K$, 也导致 $\epsilon < 0$ 的结果, 故假定 $T=2000K$,

$$\epsilon = \frac{393510 - 91450 - 211162}{282990 - 91450 + 56740 + 29600} = 0.3271$$

因此 $K_p = (0.18708)/(0.6729)(3.1380) = 0.0886$, 得 $\log_{10} K_p = -1.053$, 所对应的表中值为 -2.384 , 这组值和接下来的一些计算结果, 被概括在表 12-1 中, 通过最后的比较可得绝热火焰温度在 $2300K < T < 2325K$.

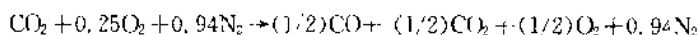
表 12-1

T/K	2000	2100	2300	2325	2350	2400
$\log_{10} K_p$ (计算)	-1.053	-1.251	-1.845	-1.954	-2.104	-2.51
$\log_{10} K_p$ (表)	-2.884	-2.539	-1.94	-1.872	-1.306	-1.679
计算值-表中值	1.8	1.2	0.1	-0.1	-0.3	-0.8

- 12.32 二氧化碳在空气中加热到一高温, 使其最后混合物中具有相同体积的一氧化碳、二氧化碳和氧(混合物中还包含其他物质)求此温度. (a) 利用表 H1; (b) 利用表 H2.

解 令 $CO_2 + aO_2 + 3.76aN_2 \rightarrow bCO + bCO_2 + bO_2 + 3.76aN_2$

式中重复的 b 表示这三种气体具有相同的摩尔分数, 由平衡得 $b=1/2$, $a=1/4$, 因此,



生成混合物为 2.44mol, 因此, 假定总压强为 1atm, CO , CO_2 和 O_2 的分压强都相等, 为 $(0.5/2.44)1 = 0.2049\text{atm}$, 所以, $CO_2 \rightleftharpoons CO + (1/2)O_2$,

$$K_p = P_{CO} \sqrt{P_{O_2}} / P_{CO_2} = \sqrt{0.2049} = 0.4527$$

即 $\log_{10} K_p = -0.3442$.

(a) 最小的表中值是 3000K 下的 -0.485 . 线性插值(不精确)得温度 $\approx 3086K$.

(b) 在 5500°R 下的表中值是 0.399, 线性插值(不精确)得

$$T \approx 5500 + [(0.344 - 0.399) / (0.012 - 0.399)](500) = 5571^\circ R$$

- 12.33 氧和氮部分相互作用, 故生成物包含这两种气体和一氧化氮(NO), $O_2 + N_2 \rightarrow 2NO$ 是基本化学反应. 如果最后平衡混合物包含 0.116mol NO , 0.942mol O_2 , 2.942mol N_2 , 确定平衡常数 K_p 和温度(K).

解

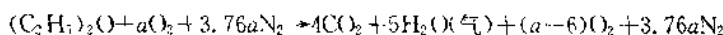
$$K_p = \frac{n_{NO}^2}{n_{O_2} n_{N_2}} \left(\frac{P}{\sum n} \right)^{-2} = \frac{(0.116)^2}{(0.942)(2.942)} \left(\frac{P}{\sum n} \right)^{-2} = 4.855 \times 10^{-3}$$

因此, $\log_{10} K_p = -2.314$, $T \approx 2600K$.

- 12.34 乙醚(C_2H_5O)和空气在 25°C, 1atm 下进入绝热燃烧室燃烧. 燃烧后的生成物在 1atm, 1600K 下离开. 求所需的空气/燃料比. 如果分解(a) 被忽略; (b) 被考虑. [建

立方程并概述其答案.]

解 (a) CO_2 和 H_2O 不分解, 空气/燃料比是 4.76a/l.

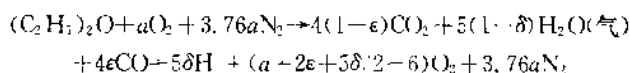


对此反应,

$$Q = 0 = 4(-393510 + 67580) + 5(-241820 + 52840) + (a-6)(0 + 44280) + 3.76a(0 + 41910) - 1(-250800)$$

故 $a=11.213$, 空气/燃料比是 4.76a/l=53.4/l.

(b) CO_2 和/或 H_2O 有分解, 空气/燃料比是 4.76a/l.



对绝热, 要求

$$Q = 0 = 4(1-\epsilon)(-393510 + 67580) + 5(1-\delta)(-241820 + 52840) + (a-2\epsilon+5\delta/2-6)(0 + 44280) + 3.76a(0 + 41910) - 1(-250800) - 4\epsilon(-110520 + 42380) + 5\delta(0 + 39522) - 1(-250880)$$

即

$$\epsilon - 3.50821\delta = 15.9452 \quad (1)$$

式(1)是分解反应 $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + (1/2)\text{O}_2$ 和 $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2$ 的平衡常数用 a, ϵ 和 δ 表达的扩充方程. 将表 H1 在 1600K 下的值代入, 可得 ($P=1$)

$$\frac{\epsilon}{1-\epsilon} \sqrt{\frac{2\epsilon+5\delta/2+a-6}{2\epsilon+5\delta/2+4.76a+3}} = 1.9679 \times 10^{-5} \quad (2)$$

$$\frac{\delta}{1-\delta} \sqrt{\frac{2\epsilon+5\delta/2+a-6}{2\epsilon+5\delta/2+4.76a+3}} = 2.1038 \times 10^{-6} \quad (3)$$

用式(1)、(2)和(3)解 a 是简单的; 用式(2)除式(3), 得

$$\frac{1-(\delta/\epsilon)}{(\delta/\epsilon)-\delta} = 8.354 \quad (4)$$

由式(1)、(4)解 ϵ 和 δ (仅需解二次方程), 然后求式(2)或(3)的平方, 代入 ϵ 和 δ 值, 就可由有关 a 的线性方程求得结果.

平衡常数与温度的关系

12.35 推导范德霍夫(Van't Hoff)等压方程.

解 对一仅有膨胀功的可逆过程, 有 TdS 关系式(题 2.324)

$TdS = dH - VdP$, 将此代入 G 的定义方程 $dG = dH - TdS - SdT$, 得 $dG = VdP - SdT$, 故

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_P = -S = \frac{G-H}{T} \quad (1)$$

当在标准压强下(1atm) P 保持常数时, 式(1)给出

$$\left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_{P^\circ} = \frac{\Delta G - \Delta H^\circ}{T} \quad \text{或} \quad \frac{\Delta G}{T} = \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_{P^\circ} = \frac{\Delta H^\circ}{T} \quad (2)$$

现由定义 $\ln K_p = -\Delta G / R_u T$, 故在等压 $P = P^\circ$ 下求得

$$-R_u \left(\frac{d \ln K_p}{dT}\right)_{P^\circ} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_{P^\circ} = -\frac{1}{T^2} \Delta G$$

即

$$\frac{\Delta G}{T} = \left(\frac{\partial \Delta G}{\partial T}\right)_{P^\circ} = R_u T \left(\frac{d \ln K_p}{dT}\right)_{P^\circ} \quad (3)$$

比较式(2)、(3)得范德霍夫方程

$$\left(\frac{d \ln K_p}{dT}\right)_{P^\circ} = \frac{\Delta H^\circ}{R_u T^2} \quad (4)$$

12.36 指出在较小的温度范围内, $\ln K_p$ 是 $1/T$ 的线性函数.

解 由微分的链式关系

$$\frac{\Delta H^\circ}{R_u T^2} = \frac{d(\ln K_p)}{dT} = \frac{d(\ln K_p)}{d(1/T)} \frac{d(1/T)}{dT} = -\frac{1}{T^2} \frac{d(\ln K_p)}{d(1/T)}$$

有 $d(\ln K_p)/d(1/T) = -\Delta H^\circ/R = \text{常数}$

(因为在较小的温度间隔内, ΔH° 是基本不变的。)

12.37 表 H1 表示平衡常数的对数随温度增长, 这对分解反应意味着什么?

解 由范德霍夫方程(题 12.35), $\Delta H^\circ > 0$, 因此, 反应是(在标准状况下)吸热反应, 即在分解双原子分子时需要能量。

12.38 一气体按反应方程 $A_2 \rightleftharpoons 2A$ 分解, 指出若当温度恒定而压强增加时, 平衡符合李恰德利尔(Le Chatelier)原理。

解 令 $A_2 = (1-\epsilon)A_2 + \epsilon A_2 = (1-\epsilon)A_2 + 2\epsilon A$

在通常情况下可得

$$K_p = \frac{4}{(1/\epsilon)^2 - 1} P$$

压强增大的影响必然是降低 $4/(1/\epsilon^2 - 1)$, 由于 K_p 仅是温度的函数, 因此, ϵ 必须下降, 故增加压强的影响是降低生成物的体积百分数, 这与李恰德利尔原理一致。

12.39 推导下列形式的范德霍夫方程积分式:

$$\log \frac{K_{p_3}}{K_{p_1}} = \frac{T_2(T_1 - T_3)}{T_3(T_2 - T_1)} \log(K_{p1}/K_{p2})$$

式中 \log 表示或者为自然对数或者为常用对数。

解 若 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 和 (x_3, y_3) 表一直线上的三个点, 则

$$\frac{y_3 - y_1}{x_3 - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \text{或} \quad y_3 - y_1 = \frac{x_3 - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1)$$

参照题 12.36, 将 $y = \ln K_p$, $x = 1/T$ 代入, 就可得所要求的方程。

12.40^D $H_2O \rightleftharpoons H_2 + (1/2)O_2$ 在 3000K 下, 有 $\log_{10} K_p = -1.343$, 在 2800K 下, 有 $\log_{10} K_p = -1.658$, 估计在 2900K 下的值。(a) 使用线性插值; (b) 更精确方法, 将(b)的结果与 -1.495 (表 H1 中值)比较。

解 (a) $\log_{10} K_p \approx (1/2)[(-1.658) + (-1.343)] = -1.501$

(b) 若 $\log_{10} K_p = a + b/T$, 则在 2800K, $-1.658 = a + 3.5714 \times 10^{-4}b$; 在 3000K, $-1.343 = a + 3.3333 \times 10^{-4}b$, 解得 $b = -13230$, $a = 3.0670$, 则在 2900K,

$$\log_{10} K_p = 3.0670 - 13230/2900 = -1.495$$

12.41^D 对 $H_2 \rightleftharpoons 2H$, 在 3000°R 下有 $\log_{10} K_p = -7.943$, 在 4000°R 下有 -4.394, 估计在 3500°R 下的值。(a) 使用线性插值; (b) 更精确的方法, 将(b)的结果与 -5.919 (表 H2 中值)比较。

解 (a) $\log_{10} K_p = (1/2)[(-7.943) + (-4.394)] = -6.169$

(b) 若 $\log_{10} K_p = a + b/T$, 则在 3000°R, $-7.943 = a + 3.3333 \times 10^{-4}b$; 在 4000°R, $-4.394 = a + 2.50 \times 10^{-4}b$, 解得 $b = -42590$, $a = 6.2535$, 因此, 在 3500°R,

$$\log_{10} K_p = 6.2535 - 42590/3500 = -5.915$$

12.42^D 使用题 12.39 的公式, 计算反应 $H_2O \rightleftharpoons H_2 + (1/2)O_2$ 在 2900K 下的平衡常数, 在 2800K 下, $K_p = 0.02198$; 在 3000K 下, 为 0.04539。

解 令 $T_1 = 2800K$, $T_2 = 3000K$, $T_3 = 2900K$, 由公式得 $\log_{10}(K_{p3}/0.02198) = 0.16292$, 即 $K_{p3} = (0.02198)(1.4552) = 0.03199$, 而 $\log_{10} K_{p3} = -1.495$, 与表 H1 的值完全相同。

12.43^D 利用题 12.39 的公式计算反应 $H_2 \rightleftharpoons 2H$ 在 3500°R 下的平衡常数。

在 3000°R 下, $K_p = 1.140 \times 10^{-8}$, 在 4000°R 下, $K_p = 4.036 \times 10^{-5}$, 将计算结果与来自表 H2 的值 1.205×10^{-6} 比较。

解 令 $T_1 = 3000^\circ R$, $T_2 = 4000^\circ R$, $T_3 = 3500^\circ R$, 由公式得 $\log_{10}(K_{p3}/1.140 \times 10^{-8}) = 2.028$, 即 $K_{p3} = (1.140 \times 10^{-8})(106.7) = 1.216 \times 10^{-6}$ 。

12.44 OTEC 工厂的设计是令人感兴趣的, 在该工厂设计中, 氨在 1atm, 300K 下的性质起

着作用. 所有标准的热力学数据都没考虑在此条件下分解的可能性. 试从 12. 21 题的数据中分析此设计的正确性.

解 在积分形式的范德霍夫方程(题 12. 39)中代入参考点数据 $(T_1, K_p) = (500\text{K}, 3. 211)$ 和 $(T_2, K_p) = (1000\text{K}, 1082)$, 求得 $T_3 = 300\text{K}$, $K_{p3} = 1. 370 \times 10^{-3}$, 因(见题 12. 21),

$$K_{p3} = 1. 299 \frac{\epsilon_3^2}{(1 - \epsilon_3^2)}$$

求得 $\epsilon_3 = 0. 0325$, 即分解了 3. 25%, 这在计算氨的热力学性质时能忽略不计, 不过对传热将产生较大影响.

- 12. 45** 参照题 12. 21, 在什么温度(K)下, 大气压下氨、氢、氮的混合物中, 有 50% 氢气被分解.

解 若 $x_{\text{H}_2} = 3\epsilon/2(1 + \epsilon) = 1/2$, 则 $\epsilon = 1/2$, 则 $1/2, K_p = (1. 299)(1/3) = 0. 433$, 现通过题 12. 21 的数据由范德霍夫方程式得 $\ln K_p = 12. 8066 - 5820/T$ [这与题 12. 44 采用的一致], 则 $-0. 8370 = 12. 8066 - 5820/T$, 即 $T = 427\text{K}$.

- 12. 46^D** 利用水分解反应 $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2$ 的平衡常数, 求下列条件下反应的焓值 ΔH° / (kJ/kmol). (a) 500K; (b) 1500K; (c) 2500K; (d) 从计算结果可总结出什么?

解 由题 12. 36

$$\Delta H^\circ \approx -R_u \frac{d(\ln K_p)}{d(1/T)} \approx -R_u \frac{\Delta(\ln K_p)}{\Delta(1/T)}$$

当然, 公式中的差值 $\Delta(1/T) = (1/T_2) - (1/T_1)$ 应尽可能小. (a) 在 500K, $\ln K_p = -52. 6970$; 在 1000K, $\ln K_p = -23. 1686$. 因此,

$$\Delta H^\circ \approx (-8. 31451) \frac{(-23. 1686) - (-52. 6970)}{(1/1000) - (1/500)} = 245514 \text{ kJ/kmol}$$

(b) 在 1400K, $\ln K_p = -14. 6145$; 在 1600K, $\ln K_p = -11. 9274$, 因此 $\Delta H^\circ \approx 250230 \text{ kJ/kmol}$.

(c) 在 2400K, $\ln K_p = -5. 6252$; 在 2600K, $\ln K_p = -4. 6535$, 因此 $\Delta H^\circ \approx 252071 \text{ kJ/kmol}$.

(d) ΔH° 的变化, $252071 - 245514 = 6557 \text{ kJ/kmol}$ 仅为平均值 248793 kJ/kmol 的 2. 6%, 所以, 在忽略反应中焓随温度的变化时, 结果还是相当精确的. 换句话说, 积分形式的范德霍夫方程可以采纳.

- 12. 47^D** 利用水分解反应 $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2$ 的平衡常数, 求在下列条件下反应的焓值 ΔH° (Btu/lb_m mole). (a) 1000°R; (b) 3000°R; (c) 5000°R; (d) 从计算结果可总结出什么?

解 如题 12. 46

$$\Delta H^\circ \approx -R_u \frac{\Delta(\ln K_p)}{\Delta(1/T)}$$

(a) 在 500°R, $\ln K_p = -99. 161$; 在 1000°R, 为 $-46. 791$, 在 1500°R, 为 $-29. 075$. 由 500°R 和 1000°R 的数值得

$$\Delta H^\circ \approx -(1. 986) \frac{(-46. 791) - (-99. 161)}{(1/1000) - (1/500)} = 104000 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$$

由 1000°R 和 1500°R 的数值得

$$\Delta H^\circ \approx -(1. 986) \frac{(-29. 075) - (-46. 791)}{(1/1500) - (1/1000)} = 105550 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$$

因此, 1000°R 下的平均值为 $\Delta H^\circ \approx 104775 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$.

(b) 在 2500°R, $\ln K_p = -14. 785$; 在 3000°R 为 $-11. 174$; 在 3500°R 为 $-8. 584$. 仿照(a) 中的计算, 可得平均值 $\Delta H^\circ \approx 107790 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$.

(c) 在 4500°R, $\ln K_p = -5. 121$; 在 5000°R 为 $-3. 905$; 在 5500°R 为 $-2. 908$. 还是按(a) 中的方法计算, 得 $\Delta H^\circ \approx 108780 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$.

(d) ΔH° 的变化 $108780 - 104775 = 4005 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$, 为平均值 $106780 \text{ Btu/lb}_m \text{ mole}$ 的 3. 8%. 因此, 在忽略反应焓随温度的变化时, 结果还是相当精确的.

- 12.48^D 在 500K 下的反应 $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2$, 利用平均焓值 $\Delta H^\circ = 248793\text{kJ/kmol}$ (见题 12.64) 计算平衡常数 K_p , 误差是多少?

解 在 500K 附近的范德霍夫方程为

$$\ln K_p = a - (\overline{\Delta H^\circ}/R_u T)$$

题 12.46 表示当 $\overline{\Delta H^\circ} = 245514\text{kJ/kmol}$, 并 a 取一特定的值时, 计算值在 500K (和 1000K) 与实际值精确一致. 因此, 若 a 值不变, 而 $\overline{\Delta H^\circ}$ 取平均值 248793kJ/kmol , 则 $\ln K_p$ 产生误差

$$\frac{-1}{(8.3145)(500)}(248793 - 245514) = -0.789$$

或百分误差为 $(0.789/52.6970)(100\%) = 1.5\%$. 对 K_p 而言, 所对应的百分误差为 $(e^{-0.789} - 1) \times (100\%) = -54.5\%$, 这一结果表明通过插值获得与表中平衡常数一致的准确值是困难的.

- 12.49^D 在 1000°R 下的反应 $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2 + (1/2)\text{O}_2$, 利用平均焓值 $\Delta H^\circ = 106780\text{Btu/lb}_m\text{ mole}$ (见题 12.47) 计算平衡常数 K_p , 误差为多少?

解 在 1000°R 附近的范德霍夫方程为

$$\ln K_p = a - (\overline{\Delta H^\circ}/R_u T)$$

题 12.47 精确给出 $\overline{\Delta H^\circ} = 104775\text{Btu/lb}_m\text{ mole}$, 而采用平均值 $106780\text{Btu/lb}_m\text{ mole}$ 时, $\ln K_p$ 的误差为

$$\frac{-1}{(1.986)(1000)}(106780 - 104775) = -1.01$$

百分误差为 $(1.01/46.791)(100\%) = 2.2\%$, 然而, 所对应的 K_p 的误差则为 $(e^{-1.01} - 1)(100\%) = -63.6\%$, 这一结果也表明要通过插值获得与表中平衡常数一致的准确值是困难的.

杂题

- 12.50 推导计算中性原子 A 电离平衡常数的公式.

解 令 $A = (1-\epsilon)A + \epsilon A = (1-\epsilon)A + \epsilon A^+ + \epsilon e^-$, 式中 A^+ 代表单一的离子而 e^- 则为电子, 对方程式右边采用摩尔分数, 有

$$K_p = \left(\frac{\epsilon}{1+\epsilon}P\right)\left(\frac{\epsilon}{1+\epsilon}P\right) / \left(\frac{1-\epsilon}{1+\epsilon}P\right) = \left(\frac{\epsilon^2}{1-\epsilon^2}P\right)$$

- 12.51 确定部分分解气体的状态公式. 假定 $A_2 \rightleftharpoons 2A$, 两种物质都服从理想气体状态方程 $PV = nR_u T$.

解 由道尔顿分压定理, 平衡混合物的总压强为

$$P = P_A + P_{A_2} = (n_A + n_{A_2})(R_u T/V)$$

现 $n_A = m_A/M_A$, $n_{A_2} = m_{A_2}/M_{A_2}$, 而 $M_{A_2} = 2M_A$, 因此, 让总质量为 $m = m_A + m_{A_2}$,

$$P = \left[\frac{m - m_{A_2}}{M_{A_2}/2} + \frac{m_{A_2}}{M_{A_2}} \right] \frac{R_u T}{V}$$

最后, 定义分解度为 $\alpha = m_A/m$, 则

$$P = \left[\frac{(1+\alpha)m}{M_{A_2}} \right] \frac{R_u T}{V} = Z\rho RT$$

式中 $Z = 1 + \alpha$, $\rho = m/V$, $R = R_u/M_{A_2}$.

- 12.52 对题 12.51 $A_2 \rightleftharpoons 2A$ 的平衡, 指出 $K_p = 4(Z-1)^2 P/[Z(2-Z)]$.

解

$$K_p = \frac{n_A^2}{n_{A_2}} \frac{P}{n_A + n_{A_2}} = \frac{(n_A/n_{A_2})^2 P}{n_A/n_{A_2}} + 1$$

而

$$\frac{n_A}{n_{A_2}} = \frac{m_A}{m_{A_2}} \frac{M_{A_2}}{M_A} = \frac{\alpha}{1-\alpha}(2) = \frac{2(Z-1)}{2-Z}$$

故

$$K_p = \frac{4(Z-1)^2/(2-Z)^2}{Z/(2-Z)} P = \frac{4(Z-1)^2}{Z(2-Z)} P$$

- 12.53** (a) 开尔文(Kelvin)最初推导的化学电池的电动势是怎样的? 为什么这是有错误的? (b) 更准确的推导是怎样的? 两者有何不同?

解 (a) 开尔文的观点是化学热(Q)和电功是相等的. 因此若通过电势差 γ , 转移电荷 q , 则 $Q = q\gamma$. 从化学的角度, 若 ν 为形成负极的金属的化合价, F_0 表示法拉第常数(1mol 电子的总电荷), 则 $q = \nu F_0$, 故 $Q = \nu F_0 \gamma$.

(b) 应用题 4.189 推导的吉布斯—亥姆霍兹方程

$$U = F - T(\partial F / \partial T)_\nu$$

可见, $F \equiv$ 电能 $= \nu F_0 \gamma$, $U \equiv$ 化学能 $= Q$, 因此, $Q = \nu F_0 [\gamma - T(\partial \gamma / \partial T)]$ [注意该式中对开尔文表达式的纠正项].

- 12.54** (a) 我在热力学教材中说燃料电池输出的电功等于吉布斯函数的变化, 这是为什么? (b) 氧气和氢气在 1atm 下进入一燃料电池, 形成水并以蒸汽的形式离开. 整个反应在 500K 下进行, 所产生的电压是多少伏? 假定在 500K 下列理想气体的熵值为(kJ/kmol·K): 蒸汽: 206.413; 氢气: 145.628; 氧气: 220.589.

解 (a) 对稳态流动, 若忽略动能和势能变化, 有 $Q + W_{\text{电}} = \Delta H$, 现假定电池是可逆等温的, $\Delta H = \Delta(G + TS) = \Delta G + T\Delta S = \Delta G + Q$, 因此 $W_{\text{电}} = \Delta G$.

(b) 对 $\text{H}_2 + (1/2) \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$,

$$\Delta H = 1(-241820 + 6920) - 0 - 0 = -234900 \text{ kJ/kmol} = -234900 \text{ J/mol}$$

$$\Delta S = \Delta S^\circ = 206.413 - 145.628 - (1/2)(220.589) = -49.591 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

因此,

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = (-234900) - (500)(-49.591) = -210145 \text{ J/mol}$$

所以

$$\gamma = \frac{-\Delta G}{\nu F_0} = \frac{210145 \text{ J/mol}}{2(96485 \text{ C/mol})} = 1.09 \text{ J/C} = 1.09 \text{ V}$$

第十三章 条 题

统计热力学

13.1 阐明用统计方法描述一个热力学系统的一般概念.

解 考虑一个具有大量不同能量的粒子构成的系统,各种可能能量粒子的分布构成了系统的一个微观状态,统计逼近就是获得这些微观状态的平均值,并将此视为宏观热力学状态.一个宏观系统的热力学概率(w)被定义为对宏观态起作用的微观态的数量,注意 $w \geq 1$,而数学上的概率则不超过一.

13.2 什么是玻尔兹曼(Boltzmann)方程?它是怎样推导得到的?

解 玻尔兹曼方程是 $S = k \ln w$,式中 k 为玻尔兹曼常数($\approx 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), S 是熵.考虑将一个完全绝热的容器被一块隔板分成两部分,两部分中都充满气体,其熵分别为 S_A 和 S_B ,它们的热力学概率分别为 w_A 和 w_B .如果将隔板移去,最终熵将是和 $S_A + S_B$,而最终概率是乘积 $w_A w_B$,这将导致 S 和 w 之间的函数关系成为 $S = \text{常数} \times \ln w$ (加上连续的要求),由于 w 不能小于(单位)1,而 k 是一个正的常数(参见题 13.14),所以 S 不会小于零.

13.2' 考虑一个由 N 个可区分的粒子构成的系统, (N 是一个非常大的数),每一个粒子具有允许能量 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots$, 确定系统在一般意义上的最可几宏观态.

解 由组合数,我们知道对一个给定的宏观态 (n_1, n_2, n_3, \dots) , 其中 n_i 是能量为 ϵ_i 的粒子数,可以给出 $w = N! / (n_1! n_2! n_3! \dots)$ 种组合(即这是所经历的微观状态的数量).我们要找出热力学概率 w 为最大的 n_i , 这等价于求下式的最小值:

$$\ln \frac{N!}{w} = \sum \ln n_i! \approx \sum n_i (\ln n_i - 1) \quad (1)$$

上式中最后一步利用了斯特林(Stirling)近似.由假定,所有 n_i 都和 N 一样是大数,求最小值,必须有约束 $\sum n_i = N$ (固定的粒子数)和 $\sum n_i \epsilon_i = E$ (固定的总能),因此拉格朗日(Lagrange)乘数法给出条件:

$$0 = \frac{\partial}{\partial n_i} \left[\sum n_i (\ln n_i - 1) + \lambda (\sum n_i - N) + \mu (\sum n_i \epsilon_i - E) \right] = \ln n_i + \lambda + \mu \epsilon_i \quad (2)$$

由此,对 $j=1, 2, 3, \dots, n_j \propto e^{-\lambda - \mu \epsilon_j}$ 定义配分函数 $Z \equiv \sum n_j e^{-\mu \epsilon_j}$, 我们可以通过归一化 $N = \sum n_i = e^{-\lambda} Z$ 消去常数 λ , 因此当 $w = w_{\max}$ 时,

$$n_i = \frac{N}{Z} e^{-\mu \epsilon_i} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式中参数 μ 为一未定数.

13.3 参考题 13.2, 用配分函数给出系统的平衡熵.

解 可以假定,系统趋向于它的最可几状态,故 $S \rightarrow k \ln w_{\max}$ [这构成了熵原理的统计基础题 3.124], 用 n_i 乘题 13.2 中(2)式并求和,利用约束和题 13.2(1)式,有

$$0 = \sum n_i \ln n_i + \lambda \sum n_i + \mu \sum n_i \epsilon_i \approx [\ln N! - \ln w_{\max} + N] + [(\ln Z - \ln N) N] + \mu E \\ = [\ln N! - N(\ln N - 1)] - [\ln w_{\max} - (\mu E + N \ln Z)]$$

在斯特林近似下,第一个括号中的两项消失了,由此得到

$$S = k \ln w_{\max} = k(\mu E + N \ln Z) \quad (1)$$

13.4 由题 13.3 式(1),推导 $\mu = 1/(kT)$.

解 因为系统的体积保持常数,故 S, μ 等参数,将仅仅是 E 的函数.现由第一定律给出 $dQ = 0 = dE$, 即 $TdS = dE$, 或 $dS/dE = 1/T$, 因此

$$\frac{1}{T} = k \left[\frac{d\mu}{dE} E + \mu + \frac{N}{Z} \frac{dZ}{d\mu} \frac{d\mu}{dE} \right]$$

但是

$$\frac{dZ}{d\mu} = - \sum \epsilon_i e^{-\epsilon_i / kT} = - \sum \epsilon_i \left(\frac{Z}{N} \right) = - \frac{ZE}{N}$$

因此, $1/T = k\mu$, 即 $\mu = 1/(kT)$.

作为一个有用的推论, 我们可以写出

$$\frac{dZ}{d\mu} = - \left(\frac{dZ}{dT} \right) (kT^2) = - \frac{ZE}{N}$$

即

$$E = NkT^2 \frac{d(\ln Z)}{dT} \quad (1)$$

13.5 叙述玻耳兹曼均分原理.

解 粒子的每个自由度贡献 $(1/2)kT$ 给它的时均能量.

13.6 将能量均分原理应用于理想气体.

解 一具有三个独立平移运动方式(平行于 x, y, z 轴)的点粒子, 将有平均动能 $3[(1/2)kT]$.

因此, 一摩尔气体(即 $N_A = 6.022 \times 10^{23}$ 粒子)有内能 $U = (3/2)N_A kT = (3/2)R_u T$ (参见题 3.13), 相应的比热为

$$C_v = (dU/dT)_v = \frac{3}{2} R_u$$

13.7 能量均分原理的应用有什么限制?

解 要估计一个复合分子的总自由度数是困难的. 例如, 一个长链的碳氢化合物分子能传递平移和旋转运动, 但是, 到什么程度能出现碳原子沿链传播的横向振动? 这些振动是否很重要, 以至于要将其视为一个自由度?

13.8 推导经典旋转子的配分函数.

解 设绕着固定轴旋转的角动量为 p_ϕ , 其中 ϕ 表示方位角(单一自由度)旋转的动能是 $\epsilon = p_\phi^2 / (2I)$, 式中 I 是初始动量, 由于 p_ϕ 能任意取值(经典旋转子对配分函数的求和将成为一个积分), 故有

$$\begin{aligned} Z &= \sum e^{-\epsilon_i / kT} = \sum e^{-p_\phi^2 / 2IkT} = \left(\frac{1}{a_{\text{rot}}} \right) \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{p_\phi^2}{2IkT}\right) dp_\phi d\phi \\ &= \left(\frac{2\pi}{a_{\text{rot}}} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{p_\phi^2}{2IkT}\right) dp_\phi = \frac{\sqrt{8\pi^3 IkT}}{a_{\text{rot}}} \end{aligned}$$

常数 a_{rot} 的确切性质, 这里没有涉及.

13.9 验证题 13.8 旋转子的能量均分性.

解 对题 13.8 的结果两边取自然对数:

$$\ln Z = \frac{1}{2} \ln(8\pi^3 Ik) + \frac{1}{2} \ln T - \ln a_{\text{rot}}$$

因此, $d(\ln Z)/dT = (1/2)T$, 然后, 由题 13.4 式(1)得每一旋转运动的平均能量为

$$\frac{E}{N} = kT^2 \frac{d(\ln Z)}{dT} = \frac{1}{2} kT$$

13.10 假定 $k = R_u/N_A$, 用配分函数 Z 表示以下无量纲形式的摩尔热力学函数. (a) $U/(R_u T)$; (b) S/R_u ; (c) $F/(R_u T)$; (d) C_v/R_u .

解 (a) 设题 13.4 式(1)中的 $N = N_A$, 可得

$$\frac{U}{R_u T} = T \frac{d(\ln Z)}{dT}$$

(b) 设题 13.3 式(1)中的 $\mu = 1/(kT)$ 和 $N = N_A$, 可得 ($E = U$)

$$\frac{S}{R_u} = \frac{U}{R_u T} + \ln Z = T \frac{d(\ln Z)}{dT} + \ln Z = \frac{d}{dT} (T \ln Z)$$

(c) $F = U - TS$, 所以, 由(b)得

$$\frac{F}{R_u T} = \frac{U}{R_u T} - \frac{S}{R_u} = - \ln Z$$

$$(d) \quad \frac{C_v}{R_u} = \left(\frac{\partial(U/R_u)}{\partial T} \right)_v = \frac{d}{dT} \left[T^2 \frac{d(\ln Z)}{dT} \right]$$

13.11 推导经典谐振子(由胡克(Hooke)弹簧连接的两个点质量)的配分函数.

解 这样一个振动子的总(动能加势能)不随时间变化,由于常数 ϵ 为任意正值(在经典情况下),则

$$Z = \sum e^{-\epsilon/kT} = \text{常数} \times \int_0^{\infty} e^{-\epsilon/kT} d\epsilon = \text{常数} \times T$$

13.12 对题 13.11 的谐振子,验证其能量均分性.

解 对于由 N 个这样的振动子构成的系统,由题 13.4 式(1)得

$$U/N = kT^2 d(\ln Z)/dT = kT$$

现在每一振动子仅有一个自由度(由弹簧的伸长量衡量),而它包含两个粒子.因此,对每一个粒子,有 $U/(2N) = (1/2)kT$.

13.13 对单原子的完全气体,确认 $k = R_u/N_A$.

解 对器壁应用牛顿第二定律,对一摩尔理想气体,其动能为 $PV = (2/3)U$,式中 U 是 N_A 个粒子的表观动能,因此 $U = (3/2)R_u T$,另一方面,由题 13.6, $U = (3/2)N_A kT$,所以, $R_u = N_A k$.

13.14 对一个具有平移动能 τ_i ,振动能 ν_j ,转动能 ρ_k 的粒子系统,写出其配分函数 Z .

解 当一个粒子同时具有 i 个平移, j 个振动, k 个转动能量状态时,它的总能量为 $\epsilon_{ijk} = \tau_i + \nu_j + \rho_k$,因此

$$\begin{aligned} Z &= \sum_{ijk} \exp(-\mu \epsilon_{ijk}) = \sum_{ijk} [\exp(-\mu \tau_i)] [\exp(-\mu \nu_j)] [\exp(-\mu \rho_k)] \\ &= \sum_i \exp(-\mu \tau_i) \sum_j \exp(-\mu \nu_j) \sum_k \exp(-\mu \rho_k) = Z_{\text{平移}} Z_{\text{振动}} Z_{\text{转动}} \end{aligned}$$

13.15 简化题 13.14 的推导.

解 题 13.4 的关系式, $E/N = -d(\ln Z)/d\mu$ 表示当能量相加时,配分函数为相乘.

传输特性

13.16 对照和比较传输特性与热力学特性.

解 传输特性必须与某种物理量的传输(从一系统至另一系统,或在一系统内部)相联系.例如导热系数,相应的物理量是热能.传输特性必须用非平衡条件来定义;因此,没有温度梯度,就没有传热出现.与此相对应,热力学特性是平衡特性,原则上,两种特性都能从状态方程出发进行计算,实际上,用这种方法求取非平衡态特性是一件相当困难的事.

气体导热系数

13.17 从下列各项列出(不要推导)取决于预测温度的气体的导热系数.(a) 刚球的简单动理论;(b) 与分子间距离 r 成比例为 r^{-n} 的分子间力;(c) 反应吸引与排斥两个相互作用的双重作用势函数;(d) 一个十分准确的经验公式;(e) 为何(a)、(b)、(c)仅对单原子气体是准确的?

$$\text{解 } (a) \lambda = a \sqrt{T}, \quad (b) \lambda = a T^{1/2-2/(n+1)}$$

$$(c) \lambda = \frac{a \sqrt{T}}{\sigma^2 \Omega(T^*)}, \quad (d) \lambda = \frac{a \sqrt{T}}{1 + \sum_{i=1}^3 a_i/T_i}$$

式中 a 是一比例系数(按场合不同而异).在(c)中, σ 是碰撞直径,碰撞面积 Ω 是折合温度 $T^* = kT/\epsilon$ 的函数,式中 ϵ 是分子相互作用势函数中的势井深度.对于刚球气体, Ω 函数为 1,式(c)简化为式(a). (e)对更复杂的分子,还要包括内部自由度和化学反应的影响等附加项.

13.18^b 在 1bar 压强下,空气的导热系数(λ)在 0°C 是 0.024 W/m·K,在 250°C 是 0.0400 W/m·K,假定(a) $\lambda = aT + \beta$; (b) $\lambda = aT^n$,估计在 250K 和 1000K 空气的导热系数.

解 13.18

(a) 假定导热系数随温度简单地线性变化, 在 250K 为 23.15°C,

$$\lambda = 0.0240 - (23.15/250)(0.0400 - 0.0240) = 0.0225 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

在 1000K,

$$\lambda = 0.0240 + (726.85/250)(0.0400 - 0.0240) = 0.0705 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

(b) 如果 $\lambda = aT^s$, 则

$$s = (\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1) / (\ln T_2 - \ln T_1) = 0.3108 / 0.6499 = 0.7860, a = 2.919 \times 10^{-4},$$

因此, 在 250K,

$$\lambda = (2.919 \times 10^{-4})(250^{0.786}) = 0.0224 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

在 1000K, $\lambda = 0.0666 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (表中值为 0.0222 W/m·K 和 0.0684 W/m·K).

- 13.19^D 马克(Mark)的机械工程师标准手册第八版(1978年)给出空气的导热系数在 200°F 下为 0.0181 Btu/ft·hr·°F 和 1000°F 下为 0.0337 Btu/ft·hr·°F, 估计在 32°F 和 482°F 下的值。(a) 利用指数定律; (b) 将(a)的计算结果与题 13.18 的数据作比较.

解 13.19 (a) 如果 $\lambda = aT^s$, 则

$$s = [\ln(\lambda_2/\lambda_1)] / [\ln(T_2/T_1)] = 0.6216 / 0.7940 = 0.7829 \text{ (按温度}^\circ\text{R)}$$

而 $a = 1.123 \times 10^{-4}$, 因此, 在 32°F = 492°R,

$$\lambda = (1.123 \times 10^{-4})(492^{0.783}) = 0.0144 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$$

在 482°F, $\lambda = 0.0239 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$.

(b) 因为在 32°F = 0°C, 482°F = 250°C, 两题的对应值应有相同的比值. 在 32°F 或 0°C, 比值是 0.0144/0.0240 = 0.60; 在 482°F 或 250°C, 它是 0.0239/0.0400 = 0.598, 由此可见, 两组数据是相当一致的.

- 13.20^D 在 1bar 压强下, 气态 R12 的导热系数, 在 300K 是 0.0092 W/m·K, 在 400K 是 0.0151 W/m·K, 假定采用指数定律, 估计其在 500K 下的值.

解 13.20 假定 $\lambda = aT^s$, 则 $\ln \lambda = \ln a + s \ln T$; 故 $-4.6356 = \ln a + 5.7038s$ 和 $-4.1931 = \ln a + 5.9915s$, 解得

$$s = 1.538, \ln a = -13.4080, \text{ 即 } a = 1.5031 \times 10^{-6}$$

因此, 在 500K, $\lambda = (1.5031 \times 10^{-6})(500^{1.538}) = 0.0213 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (表中值为 0.0208).

- 13.21^D 在 14.70psia, 气态 R12 的导热系数在 0°F 是 0.0031 Btu/ft·hr·°F, 在 200°F 是 0.00763 Btu/ft·hr·°F, 采用指数定律估计其在大气压和 400°F 下的值.

解 13.21 假定 $\lambda = aT^s$, 则 $\ln(\lambda_2/\lambda_1) = s \ln(T_2/T_1)$, 即 $s = \ln(0.00763/0.0031) / \ln(600/460) = 1.582$, 因此 $\ln(\lambda_{400}/0.00763) = 1.582 \ln(860/660) = 0.4187$, 即 $\lambda_{400} = 0.0115 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$ (表中值是 0.0112 Btu/ft·hr·°F).

- 13.22 在 1bar 下, 蒸汽的导热系数在 500K 是 0.0358 W/m·K, 在 700K 是 0.0581 W/m·K, 采用指数定律, 估计其在 600K 和 800K 下的值.

解 13.22 假定 $\lambda = aT^s$, 由以上数据得 $s = 1.4389, a = 4.681 \times 10^{-6}$, 因此,

$$\lambda(600\text{K}) = (4.681 \times 10^{-6})(600^{1.4389}) = 0.0465 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\lambda(800\text{K}) = 0.0704 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

(表中值是 0.0464 W/m·K 和 0.0710 W/m·K.)

- 13.23 一些老的蒸汽参数表给出在 $P=0$ psia 下, 导热系数在 400°F 是 0.0184 Btu/ft·hr·°F, 在 800°F 是 0.0292 Btu/ft·hr·°F, (a) 在零压强下怎么会得出导热系数的非零值? (b) 将老表上的数据和根据题 13.22 中指数定律得到的数据作一比较.

解 13.23 (a) 虽然一种流体的导热系数将随压强趋零(无颗粒, 也就无传输), 但表中在零压强下给出的值则是指在几乎不变化的大气压下的值*.

(b) 如果利用题 13.22 的公式 $\lambda(\text{W/m} \cdot \text{K}) = (4.681 \times 10^{-6})[T(\text{K})]^{1.4389}$, 则在

* 即表压为零——译者注.

477.6K (400°F), $\lambda = 0.0335 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 在 699.8K (800°F), $\lambda = 0.0581 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 将这些导热系数与转换因子 $0.57818 (\text{Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}) / (\text{W/m} \cdot \text{K})$ 相乘, 可以得到在 400°F 的导热系数 $0.0194 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$ 和在 800°F 的导热系数 $0.0336 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$. 在高温下的显著变化代表了新近研究的结果.

- 13.24 (a) 用图解表示在所有三种物理状态下, 一物质的导热系数随温度的变化, 在所给曲线上标出饱和液体段(L), 饱和蒸汽段(V)和稀薄气体段(G)以及熔点和临界点温度. (b) 在哪些方面水的行为是反常的? (c) 饱和液体的导热系数随温度的变化可用什么公式来近似?

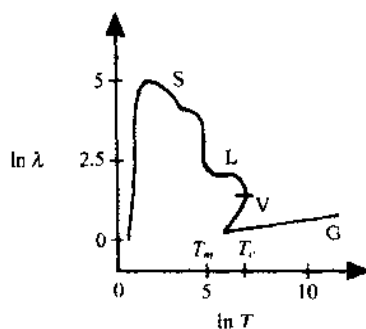


图 13-1

解 (a) 参见图 13-1.

(b) 饱和液体的导热系数随温度升高增加到一个极大值 (大约在 $0.63T_c$), 其后按图 13-1 给出的趋势下降.

(c) $\lambda = a - bT$, 当 $T < 0.75T_c$, 这是一个非常粗糙的近似.

液体导热系数

- 13.25 (a) R12 的饱和液体在 10°C 按公式 $\lambda (\text{W/m} \cdot \text{K}) = 0.07830 - 0.000366 [T(^{\circ}\text{C})]$ 计算, 结果是什么? (b) 将(a)的结果与题 13.26(a)的结果 $0.0432 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$ 比较, 有何结论? (注意 $10^\circ\text{C} = 50^\circ\text{F}$)

解 (a) $\lambda = 0.07830 - 0.000366 \times 10 = 0.07464 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

(b) 按照题 13.23 (b) 给出的转换因子, 两者精确一致.

- 13.26 在 100°F , R12 的饱和液体的导热系数是 $0.0373 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$, 在 0°F , 它是 $0.0490 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$. (a) 在 50°F , 其值是多少? (b) 当导热系数为 $0.0420 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$, 其温度为多少?

解 假定液体的导热系数随温度按线性变化 (因在 100°F , $T_r = T/T_c - 559.7/693.4 = 0.807$) 按两个数据点估计常数, 可得 $\lambda (\text{Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}) = 0.490 - (1.17 \times 10^{-4}) [T(^{\circ}\text{F})]$.

(a) $\lambda = 0.0432 \text{ Btu/ft} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{F}$

(b) $T = (0.490 - 0.0420) / (1.17 \times 10^{-4}) = 59.8^\circ\text{F}$

从上述答案, 以及题 13.18 (a) 的答案, 可发现这样一个事实, 在一种温度标尺下变化是线性的, 则在另一种标尺下, 变化也是线性的.

- 13.27 表 13-1 给出液态甲苯导热系数的实验值. 假定导热系数 λ 随压强 P 作线性变化, 对每一条等温线, 在 $\lambda = \lambda_0 + \beta P$ 式中估计参数 λ_0 和 β .

表 13-1

$T(^{\circ}\text{C}) = 35$	P, bar $\lambda / (\text{mW/m} \cdot \text{K})$	9	15	37	114	168	334
		128.9	129.1	129.6	132.4	134.6	139.6
47	P	14	24	241	322		
	λ	125.3	126.6	133.6	135.6		
57	P	73	115	199	332	373	
	λ	124.5	125.3	128.3	132.8	135.0	
72	P	23	24	133	234	513	
	λ	118.2	118.5	122.0	126.5	136.1	
87	P	32	215	492			
	λ	113.7	123.4	131.2			

解 按最小二乘法, 产生下列公式:

$$\lambda_0 = \frac{(\sum \lambda)(\sum P^2) - (\sum \lambda P)(\sum P)}{n(\sum P^2) - (\sum P)^2} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{n(\sum \lambda P) - (\sum \lambda)(\sum P)}{n(\sum P^2) - (\sum P)^2} \quad (2)$$

式中求和是对给定温度下的几个数据点进行的,表 13-2 总结了运算结果。

表 13-2

$T/^\circ\text{C}$	n	$\sum \lambda$	$\sum P$	$\sum \lambda P$	$\sum P^2$	λ_0 (mW/m·K)	β (mW/m·K·bar)
35	6	794.2	677	92225	154451	128.5 ₉	0.0334 ₇₇
47	4	521.1	601	80653	162537	125.3 ₇	0.0326 ₃₁
57	5	645.9	1092	143476	307508	121.5 ₇	0.0349 ₁₀
72	5	621.3	927	121209	336719	117.4 ₉	0.0365 ₁₇
87	3	368.3	739	94720	289313	113.5 ₉	0.0372 ₅₅

- 13.28 由题 13.27 的数据,构筑 300~360K(间隔为 20K),0~100bar(间隔为 25bar)的导热系数表。

解 题 13.27 中的参数 λ_0 和 β 也可看作随温度 T 作线性变化,这时可用最小二乘法来近似这些参数。因此, λ 将用表格表达为 P 和 T 的双重函数。然后,假定 $\lambda_0 = a + \alpha T$ 。从表 13-2 取出下列数据(注意温度的转换)。

T/K	308.2	320.2	330.2	345.2	360.2
λ_0 /(mW/m·K)	128.59	125.37	121.55	117.49	113.59

应用题 13.27 的式(1)和(2)(用 T 取代式中 P 等)求得 $a = 218.522 \text{ mW/m} \cdot \text{K}$ 和 $\alpha = -0.29208 \text{ mW/m} \cdot \text{K}^2$ 。用相同的形式,写出 $\beta = b_0 + b_1 T$,求得 $b_0 = 5.67232 \times 10^{-3} \text{ mW/m} \cdot \text{K} \cdot \text{bar}$, $b_1 = 8.80091 \times 10^{-5} \text{ mW/m} \cdot \text{K}^2 \cdot \text{bar}$,结合 λ_0 和 β 的计算结果,可得

$$\lambda = 218.522 + (5.67232 \times 10^{-3})P - 0.29208T + (8.0091 \times 10^{-5})PT \quad (1)$$

由(1)式得到的 λ 值示于表 13-3。

表 13-3

λ_0 /(mW/m·K) \ P /bar \ T /K	0	25	50	75	100
300	130.9	131.6	132.5	133.3	134.1
320	125.1	125.9	126.8	127.6	128.5
340	119.2	120.0	121.0	121.8	122.8
360	113.4	114.3	115.3	116.2	117.2

- 13.29 一些实验指定液体试样的厚度,并给出不同厚度下的导热系数,是否有必要?

解 根据傅里叶-比奥(Fourier-Biot)方程, $\dot{Q} = -kA(\Delta T/\Delta X)$, k 独立于 ΔX (是个确定的物性),而传热量则正比于温度梯度,对一些内部吸收能量的液体,这个比例关系反映不出。

气体黏度

- 13.30 参见题 13.17,对模型(a)~(d),气体的绝对黏度(η 或 μ)和导热系数 λ 一样对温度具有完全相同的依赖性。(当然,常数 a 对两种性质具有不同的意义。)在常温 and 大气压下,这些模型所预言的和普通气体是否一致?

解 在中等温度区间,所有模型提供的结果的精度可被接受。在扩展的温度区内,(c)和(d)更精确些,公式(c)中的常数 a 是更高次数的逼近,它也是一个温度的函数。

- 13.31 在下列情况下,压强对气体黏度的影响(如果有)是什么?
(a) 在非常低的压强下;(b) 在中等压强下(0.1~10atm
(大气压));(c) 在高压下.

解 (a) 在极低压强下,气体分子运动的表现自由程可以和所考虑的尺度(例如管径)相比拟,黏度无影响,流动被称为自由分子运动或 Knudsen 运动,黏度本身随着压强的降低而降低(参见图 13-2).

(b) 作为一次近似,没有任何影响,这个压力区间,被麦克斯韦在 1860 年首次定义为动能区.超出此范围,压缩因子 Z 偏离在此区间为 1 的值,真正与压强有关了.

(c) 和实际气体状态方程一致,黏度取决于第二、第三位力系数.

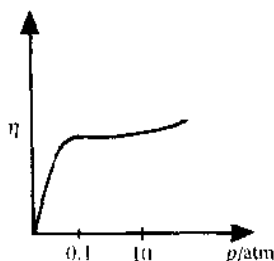


图 13-2

- 13.32 叙述在 SI 制,USCS 制和 CGS 制下的(绝对)黏度并给出各制之间的转换因子.

解 从量纲角度,黏度=应力 \times 时间. η 在 SI 单位制下是帕 \cdot 秒(Pa \cdot s), (式中 1Pa=1N/m²),在通用的 USCS 单位制下是 lb_f \cdot sec/ft²,两单位之间的关系为 1lb_f \cdot sec/ft²=47.88Pa \cdot s.在 CGS 单位制下的实用单位是厘帕,1厘帕=10⁻³Pa \cdot s.

一些采用 USCS 的资料用 lb_m/ft \cdot hr 来表示黏度,我们可通过量纲分析来适当地反映该单位:

$$[\eta] = \left[\frac{F}{A} \right] [T] = \left[\frac{ML/T^2}{L^2} \right] [T] = \left[\frac{M}{LT} \right]$$

所以其转换关系,可以利用下式得到:

$$1 \frac{\text{lb}_f \cdot \text{sec}}{\text{ft}^2} = \frac{(3600g_f) \text{lb}_m}{\text{ft} \cdot \text{hr}} = \frac{1.1583 \times 10^5 \text{ lb}_m}{\text{ft} \cdot \text{hr}}$$

- 13.33^D 在大气压下,空气的黏度在 250K 下是 1.60 \times 10⁻⁵ Pa \cdot s,在 500K 下是 2.69 \times 10⁻⁵ Pa \cdot s,估计在 0 $^{\circ}$ C=273K 和 1000K 时的黏度.假定黏度随温度(a) 成线性变化;(b) 成指数规律变化.

解 (a) $\eta(273\text{K}) = (1.60 \times 10^{-5}) + [(273-250)/(500-250)][(2.69-1.60) \times 10^{-5}]$
 $= 1.70 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

$$\eta(1000\text{K}) = (1.60 \times 10^{-5}) + [(1000-250)/(500-250)][(2.69-1.60) \times 10^{-5}]$$

$$= 4.87 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

(b) 假定 $\eta = aT^s$, 则

$$s = (\ln \eta_2 - \ln \eta_1) / (\ln T_2 - \ln T_1) = (-10.5234 - 11.0429) / (6.2146 - 5.5215)$$

$$= 0.7495$$

$$a = 2.552 \times 10^{-7}$$

所以, $\eta = (2.552 \times 10^{-7}) T^{0.7495}$, 由此

$$\eta(273\text{K}) = 1.71 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad \text{和} \quad \eta(1000\text{K}) = 4.52 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

两组结果都可和表中数值 1.71 \times 10⁻⁵ 和 4.28 \times 10⁻⁵ 作一比较.

- 13.34^D (a) 马克的机械工程师标准手册第八版给出,空气的黏度在 200 $^{\circ}$ F 下是 53.15 lb_f \cdot sec/ft² 和在 1000 $^{\circ}$ F 下是 100.8 lb_f \cdot sec/ft²,利用指数律估计在 32 $^{\circ}$ F 和 482 $^{\circ}$ F 下的值;(b) 将由(a) 得出的数值与题 13.33 (b) 公式得出的结果作比较.

解 (a) 假定 $\eta = aT^s$, 则

$$s = [\ln(\eta_2/\eta_1)] / [(T_2/T_1)] = 0.64002/0.79305 = 0.806 \quad \text{和} \quad a = 0.37952$$

即 $\eta = 0.38 T^{0.806}$. 所以,在 32 $^{\circ}$ F=492 $^{\circ}$ R, $\eta = 56.17 \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$. 在 482 $^{\circ}$ F, $\eta = 94.81 \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$.

(b) 在 32 $^{\circ}$ F 即 273K, 比值是 56.17/(1.71 \times 10⁻⁵) = 3.28 \times 10⁶, 在 482 $^{\circ}$ F 即 523K, 比值是 94.81/(2.77 \times 10⁻⁵) = 3.43 \times 10⁶. 比值的改变反映了两个数值中至少有一个与实际不一致.

- 13.35^D 在 1bar 压强下, R12 气体在 300K 的黏度是 1.26 \times 10⁻⁵ Pa \cdot s; 在 400K 是 1.62 \times 10⁻⁵ Pa \cdot s; 在 500K 温度下,预见的黏度是多少?

解 最简单的假定是线性,所以黏度为 1.98 \times 10⁻⁵ Pa \cdot s. 如果 $\eta = aT^s$, 则 $\ln \eta = \ln a + s \ln T$, 即

$$s = (\ln \eta_2 - \ln \eta_1) / (\ln T_2 - \ln T_1) = 0.2513/0.2877 = 0.8735. \text{ 这样, } \ln a = -11.2818 - 0.8735 \ln 300 =$$

-16.2641 , 即 $a = 8.6415 \times 10^{-8}$, 因此 $\eta(500\text{K}) = (8.6415 \times 10^{-8})(500^{1.877}) = 1.97 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [表中值为 $1.90 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$], 由此可得结论, 对于像 R12 这样相对复杂的分子, 指数关系也只是相对精确, 其精确程度并不比线性关系高。

- 13.36^D 在大气压下的 R12 气体的黏度, 在 -20°F 下是 $0.00249 \text{ lb}_m/(\text{ft} \cdot \text{hr})$, 在 180°F 下是 $0.00357 \text{ lb}_m/(\text{ft} \cdot \text{hr})$, 估计其在 400°F 下的值。

解 假定为线性关系,

$$\eta = 0.00357 + [(400 - 180)/200](0.00357 - 0.00249) = 0.00476 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$$

如果 $\eta = aT^s$ [一多用途的指数关系, 相应于题 13.17 中 r^{-s} 的短程力], 则

$$\eta_2 = \eta_1 (T_2/T_1)^{s-1} = (0.00357)(860/640)^{s-1} = 0.00461 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$$

如果 $\eta = aT$, 则

$$s = [\ln(\eta_2/\eta_1)]/[\ln(T_2/T_1)] = \ln 1.434/\ln 1.455 = 0.951$$

所以, $\eta = (0.00357)(860/640)^{0.951} = 0.00474 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$, (表中值为 $0.00462 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$)。

- 13.37 在一些水蒸气表上可发现在大气压下, 600K 时水蒸气的黏度是 $2.15 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 在 800K 是 $2.98 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 假如需要一个在 1500K 的近似值, 应怎样估计?

解 快捷的估计方法是假定成线性关系:

$$d\eta/dT = \text{常数} = (2.98 - 2.15) \times 10^{-5} / (800 - 600) = 4.15 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{K}$$

因此, 在 1500K ,

$$\eta = (2.98 \times 10^{-5}) + (4.15 \times 10^{-8})(1500 - 800) = 5.98 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

- 13.38 在 14.7 psia 下蒸汽的黏度如下所示: 600°F , $4.3 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$; 800°F , $5.1 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$; 1000°F , $5.8 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$. (a) 在 1200°F 下, 黏度为多少? (b) 由这些数据可得出其对温度有哪些依赖关系?

解 (a) 黏度从 600°F 到 800°F , 增加了 $0.8 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$; 从 800°F 到 1000°F , 增加了 $0.7 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$. 如果该趋势继续保持的话, 在下一个 200°F 间隔内, 增量将是 $0.6 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$. 因此, $\eta(1200^\circ\text{F}) \approx 6.4 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$.

(b) 好像是黏度对温度的二阶导数为常数, 这将构成一个对 T 的二次多项式。

液体黏度

- 13.39^D 在 1 bar , 243.0K , R12 的饱和液体的黏度是 $3.59 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 在 6 bar , 295.2K 它是 $2.13 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 指出在 270K 的黏度。

解 假定具有简单关系式 $\ln \eta = a + b/T$, 式中 a 和 b 与压强无关, 然后, 在 243.0K , $-7.9322 = a + (4.1152 \times 10^{-4})b$, 在 295.2K , $-8.4542 = a + (3.3875 \times 10^{-4})b$, 解出 a 和 b , 可得 $\ln \eta = -10.8842 + (717.33/T)$. 因此, 在 270K , $\ln \eta = -8.8274$, 即 $\eta = 2.67 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

- 13.40 根据题 13.39 的数据, 估计在 3 bar 下, 饱和液体的黏度。

解 首先必须确定与 3 bar 压强相对应的温度, 假定蒸汽压强-温度的关系为 $\ln P = \alpha + \beta/T$, 由已知数据可决定常数 $\beta = -2462.3\text{K}$, $\alpha = 16.1329$. 因此, 对 $P = 3 \text{ bar}$, 可得 $T = 272.55\text{K}$, 代入题 13.39 的公式, 得 $\ln \eta = -8.2523$, 即 $\eta = 2.61 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. (表中值在 272.3K 下为 $2.62 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$)

- 13.41^D R12 饱和液体在 -20°F 下的黏度是 $0.866 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$, 而在 60°F 下的黏度是 $0.564 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$. (a) 在 20°F 下的黏度是多少? (b) 在什么温度下黏度为 $0.620 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$?

解 (a) 假定 $\ln[\eta(\text{lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr})] = a + b/[T(^{\circ}\text{R})]$, 则由上述数据求得 $b = 1224.8^{\circ}\text{R}$, $a = -2.9295$, 因此, 在 20°F (479.7°R), $\ln \eta = -0.3762$, 而 $\eta = 0.686^{\circ}\text{R} \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$.

(b) 如果 $\eta = 0.620 \text{ lb}_m/\text{ft} \cdot \text{hr}$, 则 $-0.4780 = -2.9295 + 1224.8/T$, 即 $T = 499.61^{\circ}\text{R} = 39.9^{\circ}\text{F}$.

- 13.42^D 在 300K , 液态水的黏度是 $855 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 而在 350K 它是 $365 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 在下列情况下, 液态黏度将是多少? (a) 在 273.15K ; (b) 在 325K . 将求解结果与表中值

$1750 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和 $528 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 比较.

解 取 $\ln \eta = a + b/T$, 由给定数据求得 $b = 1789.2 \text{ K}$, $a = -13.0279$, 这样 $\ln \eta = -13.0279 + (1789.2/T)$ (a) 在 273.15 K , $\ln \eta = -6.4777$, 即 $\eta = 1.537 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 与表中值比较, 百分误差为 12.2% .

(b) 在 350 K , $\ln \eta = -7.9159$, 即 $\eta = 3.649 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 与表中值比较, 百分误差为 31.0% .

- 13.43** 在 400 K , 水的饱和蒸汽压是 2.455 bar , 饱和液体的黏度是 $237 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 在 450 K , 蒸汽压是 9.319 bar , 黏度是 $152 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. 计算在下列状态下的液体黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$). (a) 273.15 K ; (b) 5 bar . 将求解结果与表中值 $282 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和 $180 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 比较.

解 由黏度数据求得合适的公式为

$$\ln[\eta(\text{Pa} \cdot \text{s})] = 12.344 - 1598.6/[T(\text{K})]$$

由蒸汽压的数据求得

$$\ln[P(\text{bar})] = 12.9031 - 4802.0/[T(\text{K})]$$

(a) 在 $T = 373.15 \text{ K}$, $\ln \eta = -8.0599$, 即 $\eta = 316 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 其误差为 $(316 - 282)/282 = 12.1\%$.

(b) 对 $P = 5 \text{ bar}$, 由蒸汽压公式得 $T = 425.19 \text{ K}$, 此温度下 $\ln \eta = -8.5843$, 即 $\eta = 187 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 其误差为 $(187 - 180)/180 = 3.9\%$.

- 13.44** 基于题 13.43 给的公式, 在什么温度和压强下, 饱和液态水的黏度刚好是 $182 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. 将求解结果与 423.15 K , 4.757 bar 作比较.

解 由 $\ln(182 \times 10^{-6}) = 12.344 - 1598.6/T$, 求得 $T = 428.35 \text{ K}$, 其误差为 5.2 K , 由 $\ln P = 12.9031 - 4802.0/428.35$, 解得 $P = 5.434 \text{ bar}$. 解得的压强值与精确值之间的较大误差反映了由于压强变化非常敏感, 需要关于黏度的更精确的插值数据.

- 13.45^D** 在 200°F , 饱和液态水的黏度是 $63.7 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$, 在 600°F , 它是 $18.2 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$, 估计在 400°F 的黏度.

解 假定 $\ln \eta = a + b/T$, 而 η 的单位为 $\text{lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$, T 的单位为 $^\circ \text{R}$, 从已给数据求得 $b = 2191^\circ \text{R}$, $a = -15.286$, 因此在 $400^\circ \text{F} = 860^\circ \text{R}$, $\ln \eta = -15.286 + 2191/860 = -12.738$, 即 $\eta = 29.4 \times 10^{-7} \text{ lb}_f \cdot \text{sec}/\text{ft}^2$.

- 13.46** 液态甲苯的黏度如下表所示:

T/K	320	340	360	380
$\eta/(\mu\text{Pa} \cdot \text{s})$	437	357	301	258

在此情况下, 公式 $\ln \eta = a + b/T$ 的准确性如何?

解 很有必要检验在每个温度间隔上 a 和 b 是否仍基本保持常数. 可先取一对数据, 计算

$$\ln \eta_2 - \ln \eta_1 = \ln(\eta_2/\eta_1) = b(1/T_2 - 1/T_1), \quad \text{即 } b = [T_1 T_2 / (T_1 - T_2)] \ln(\eta_2/\eta_1)$$

同理,

$$a = (T_2 \ln \eta_2 - T_1 \ln \eta_1) / (T_2 - T_1)$$

由这些公式得

	平均温度 / K		
	330	350	370
a	2.6425	2.8065	2.778
b/K	1099.95	1044.23	1054.39

各值分别取平均得 $\bar{a} = 2.7245$, $\bar{b} = 1072.09 \text{ K}$, 即 $\ln \eta = 2.7245 + 1072.09/T$, 由此解得 $\mu(320 \text{ K}) = 434.8$, $\mu(340 \text{ K}) = 357.0$, $\mu(360 \text{ K}) = 299.6$, $\mu(380 \text{ K}) = 256.2$, 相对应的百分误差分别为 0.50 、 0.00 、 0.47 和 0.70 , 平均误差为 0.42% . a 和 b 引起的偏差在不同场合是有差别的.

杂题

13. 47 在文献中可看到这些名词:(i)扩散系数;(ii)热扩散系数;(iii)热扩散率.从根本上指出这些量之间的差别.

解 (i) 如果两个不同种的气体最初被一隔板隔开,移去隔板气体将相互扩散而混合.按照费克(Fick)定理,质量的传递(传质速率)将正比于浓度梯度(可与题 13.29 的傅里叶定理比较,比例系数即为扩散系数).

(ii) 热扩散系数的解释.先考虑一盛有初始温度均匀的气体混合物的容器.如果该容器一端被加热而另一端被冷却,气体混合物将出现一分离的趋势,在热端和冷端的浓度将变得不一致.故由温度梯度引起传质而出现分离,其比例系数为热扩散系数.

(iii) 热扩散率,传热研究中的一个重要参数,定义为 $\lambda/\rho c$. 式中 λ 是导热系数, ρ 是密度, c 是比热容.注意热扩散率的量纲是面积/时间.

13. 48 低速流体管内流动的实验分析显示最大速度 \bar{v}_{\max} 出现在管子的轴线上,用量纲分析法建立起 \bar{v}_{\max} 与管子半径(r)、流体黏度(η)、和轴向压力梯度($\Delta P/l$)之间的关系.

解 设 $\bar{v}_{\max} = f(r, \eta, \Delta P/l)$, 现假定 f 是各个自变量的幂函数的乘积, 即 $\bar{v}_{\max} = C r^a \eta^b (\Delta P/l)^c$, 式中 C 是无量纲的常数, 代入各个自变量的基本量纲(参见题 13.32), 有 $L T^{-1} = C L^2 (M L^{-1} T^{-1})^b (M L^{-2} T^{-2})^c$. 令相同的基本量纲指数相同, 可得 $b = -1, c = 1, a = 2$. 因此, $\bar{v}_{\max} = C r^2 [\Delta P/(\eta l)]$, 式中 C 是常数, 还无法从量纲分析确定其数值.

13. 49 一种简单的双原子气体在常温下被加热,它在温度 T_D 下分解.画出未分解的双原子气体以及分解后的单原子气体的黏性随温度的变化曲线.这样做与更详细的处理是否一致,为什么?

解 参见图 13-3, 对 $T < T_D$ 可期望 $\eta \approx a T^s$ (题 13.36), 式中 $s = 3/4$, 因此, $\ln \eta$ 随 $\ln T$ 的变化曲线为斜率 $3/4$ 的直线, 对 $T > T_D$, 直线斜率相同. 而当 $T = T_D$ 时, 黏度有一跳跃式变化. 这可以参考题 13.17 的模型(c), 得知单原子气体, 具有更小的碰撞直径, 故有更大的黏性(曲线 U), 然而, 黏性通常是降低的(曲线 L), 这是因为分解所产生的不同粒子间力对碰撞总量的影响恰好是相反的.

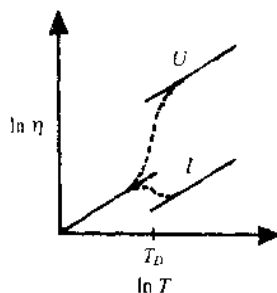


图 13-3

13. 50 解释下列名词的意义:(a) 自由分子区;(b) 调节系数;(c) 温度降落;(d) 当压强从非常低的值增加到高压值时,从圆柱中心沿径向围绕它的圆筒的传热是怎样变化的?

解 (a) 自由分子区指的是在这一区间内仅通过冷分子和热分子之间的一次碰撞进行传热,而不是通过分子之间的多次碰撞传热.

(b) 当温度处在 T_1 的粒子与温度为 T_2 的表面发生能量交换时,可预期传输的能量 \dot{Q} 与温差 $T_1 - T_2$ 成正比,调节系数就是比例系数.

(c) 在表面向外一个表面自由程内,传热不是通过宏观导热,而是通过自由分子导热[例(a)]完成,近外表面处这种温度分布的不连续性被称为“降落”或“跳跃”.

(d) 当压强非常低时,圆柱中心和圆筒之间的整个区间都是自由分子区,当压强升高时,分子之间的碰撞改变传热,在大气压及以上压强下,表面自由程变得非常小,以至于自由分子的影响仅仅是产生一些小的波动.

13. 51 普朗特数(Prandtl number): $Pr = \eta c_p / \lambda$, 在边界层现象中是重要的. (a) 指出 Pr 数是一个无量纲数;(b) 就理想气体而言,从动力学角度,指出 Pr 数将怎样随温度变化.

解 (a) 黏度、比热容、导热系数的量纲分别是

$$[\eta] = \frac{M}{L \cdot T}, \quad [c_p] = \frac{L^2}{T^2 \cdot \Theta}, \quad [\lambda] = \frac{M \cdot L}{T^3 \cdot \Theta}$$

当构成 Pr 数据关系式时, 每一个量纲都消去了。

(b) 对理想气体, $c_p = (5/2)R$ 为常数(题 13.17 和 13.30), 而 λ 和 η 都随 $T^{1/2}$ 变化, 因此, Pr 数与温度无关。

表 13-4

T/K	400	450	500	550	600
$h_f/(kJ/kg)$	533	749	976	1220	1506
$h_g/(kJ/kg)$	2716	2773	2801	2784	2682
$\lambda_f/(W/m \cdot K)$	0.688	0.678	0.642	0.580	0.497
$\lambda_g/(W/m \cdot K)$	0.027	0.033	0.042	0.058	0.093

- 13.52 表 13-4 是关于水的物性参数, 请根据关系式 $h_{fg} = a |\lambda_{fg}|^2$, 导出热力学特性 $h_{fg} \equiv h_g - h_f$ 和传输特性 $\lambda_{fg} \equiv \lambda_g - \lambda_f$ 之间的关系: (kJ/kg) 。

解 取对数 $\ln h_{fg} = \ln a + s \ln |\lambda_{fg}|$, 可利用题 13.27 给出的最小二乘法 ($n=5$) 估计 $\ln a$ 和 s 的值, $[\lambda \rightarrow \ln h_{fg}, P \rightarrow \ln |\lambda_{fg}|, \lambda_0 \rightarrow \ln a, \beta \rightarrow s]$, 其结果是: $\ln a = 8.15054, s = 1.20539$, 因此, 经验公式是

$$\ln h_{fg} = 8.15054 + 1.20539 \ln |\lambda_{fg}| \quad \text{即 } h_{fg} = 3465.2 |\lambda_{fg}|^{1.20539}$$

表 13-5 给出了其与精确值的比较, $\ln h_{fg}$ 的最大误差是 0.48% (在 400K), 平均误差是 0.01%。

表 13-5

T/K	400	450	500	550	600
$\ln h_{fg}$ (计算)	7.6515	7.6220	7.5318	7.3669	7.0581
$\ln h_{fg}$ (表)	7.6885	7.6128	7.5093	7.3550	7.0699
误差	-0.0370	+0.0092	+0.0225	+0.0119	-0.0118

封闭系统的熵

- 13.53 解释熵和最大有用功的概念

解 如题 3.31 所述, 并不是一个系统中的所有能量都能用来做功, 导热就是能量传输中不做功的一个例子, 可提出下列定理:

- (1) 一孤立系统仅仅当其处在非平衡状态下才能做功。
- (2) 当一系统被可逆地引入平衡状态 (即“死态”) 时, 才有最大的输出功。

定理 2 中, 可逆功的大小就是系统的熵 (对一给定的非平衡状态), 因此有定理 3:

- (3) 在“死态”, 系统的熵为零, 此时, 不流动的熵用 Ψ 表示, 比熵用 ψ 表示。

- 13.54 推导一封闭系统的熵在环境参数 (P_0, T_0) 下随参数 (P_1, v_1, T_1) 的表达式, 并总结出当系统参数变为 (P_2, v_2, T_2) 时的结果。

解 将热力学第一定律应用于一封闭系统 $dw = dq - du = Tds - du$, 式中 w 是系统作的功, 当与环境的传热量可逆时, 从系统的一个实际状态 (下标 1) 到死态 (下标 0) 积分得 $w = T_0(s_0 - s_1) - (u_0 - u_1)$, 现在, 既然系统的 (比) 体积变化是 $v_0 - v_1$, 而环境的变化是 $v_1 - v_0$, 则环境对系统做功 $P_0(v_1 - v_0)$, 即系统对环境做功是 $-P_0(v_1 - v_0)$, 最后一式代表功 w 的不可逆部分, 因此,

$$\psi = w - [-P_0(v_1 - v_0)] = (u - u_0) + P_0(v_1 - v_0) - T_0(s_1 - s_0)$$

更一般地, 对于状态 1 和状态 2 之间的变化

$$\Delta\psi = \Delta u + P_0\Delta v - T_0\Delta s$$

- 13.55 高乌-斯托多拉 (Guoy-Stodola) 方程是什么?

解 如果一热力学系统经历一不可逆过程, 经过此过程它的熵增加了 ΔS_{sys} , 假定 T_0 是环境温度, 则系统熵的变化是 $\Delta\Psi = -T_0\Delta S_{\text{sys}} < 0$, 换句话说, 就是可能对环境做功 $T_0\Delta S_{\text{sys}}$ 。

- 13.56 从温度 T_h 下的热量 Q_h 推导最大可能有用功的表达式 [在此情况下, 熵被称为 Q_h 的品质]。

解 由题 6.11 和 6.12 可知, (可逆) 卡诺循环可作最大的功, 因此, $\Psi = \eta * Q_h = Q_h (1 - T_c / T_h)$.

13. 57^D 系统 A, 在 500K 下提供 1000kJ 的热量; 系统 B, 在 400K 下提供 2000kJ 的热量. 哪个系统的热的质量更高? 假定环境温度是 300K.

解 $\Psi_A = 1000(1 - 300/500) = 400\text{kJ}$
 $\Psi_B = 2000(1 - 300/400) = 500\text{kJ} > \Psi_A$

13. 58^D 系统 A, 在 350°F 下提供 3000Btu 的热量; 系统 B, 在 500°F 下提供 2000Btu 的热量. 哪个系统的热的质量更高? 假定环境温度是 80°F.

解 $\Psi_A = 3000(1 - 540/810) = 1000\text{Btu}$
 $\Psi_B = 2000(1 - 540/960) = 875\text{Btu} < \Psi_A$

13. 59 由于导热, 温度为 T_h 的一物体将热量 (Q) 传递给另一温度为 T_c 的物体, 其熵的变化是多少? 假定两物体属于环境温度为 T_0 的一个独立的系统.

解 由题 13. 56, 对于处于 T_h 温度下的热源, 其熵是

$$\Psi_h = Q(1 - T_0/T_h)$$

而对于处在 T_c 温度下的热沉, 其熵是

$$\Psi_c = Q(1 - T_0/T_c)$$

通过导热, 其熵的变化为

$$\Psi_c - \Psi_h = QT_0(1/T_h - 1/T_c) < 0$$

13. 60 用高乌-斯托多拉方程重新叙述题 13. 59 的结果.

解 $\Delta\Psi = \Psi_c - \Psi_h = T_0(Q/T_h - Q/T_c) = T_0(-\Delta S_h - \Delta S_c) = -T_0\Delta S_{\text{sys}}$

13. 61 证明, 体积 $V = mv$ 的容器含有质量为 m , 压强为 P 的理想气体, 当环境压强为 P_0 时, 其比熵为 $\phi = P_0 v \{1 - (P/P_0)[1 - \ln(P/P_0)]\}$. (容器与环境处于热平衡状态).

解 由题 13. 54, $\phi = u - u_0 + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0)$. 由于容器和环境具有相同的温度, $u = u_0$. 另一方面, 由 Tds 关系式, $s - s_0 = c_p \ln T/T_0 - R \ln P/P_0$. 因此, 若 $T = T_0$, $s - s_0 = -R \ln P/P_0$. 同时, $v = RT/P$, 所以, $v_0 = RT_0/P_0 = Pv/P_0$. 作了这些替代后, 可导出所需结果.

13. 62 在 5bar、1000K 下, 一封闭系统按方程 $Pv^{1.3} = \text{常数}$ 的规律等熵膨胀至 1bar, 损失了多少功(kJ/kg)?

解 对一可逆绝热过程而言, 没有功的损失.

13. 63^D 10bar、1000K 的蒸汽被冷却至 5bar、500K 能做多少有用功(kJ/kg)? 取环境条件为 1bar、25°C.

解 按题 13. 54 给出的一般式并利用表 A5 给出的数据, 得

$$\begin{aligned} w_{\text{max}} &= \phi - \phi_2 = u_1 - u_2 - P_0(v_1 - v_2) - T_0(s_1 - s_2) \\ &= [h_1 - (P_1 - P_0)v_1] - [h_2 - (P_2 - P_0)v_2] - T_0(s_1 - s_2) \\ &= [3984 - (900)(0.460)] - [2912 - (400)(0.452)] - (298.15)(8.336 - 7.177) \\ &= 493\text{kJ/kg} \end{aligned}$$

13. 64^D 150psia、1000°F 的蒸汽被冷却至 60psia、450°F, 能做多少有用功(Btu/lb_m)? 取环境条件为 14.7psia、77°F.

解 将表 A3 给出的数据代入题 13. 63 推导的表达式, 并利用一般转换因子 144/778.

$$\begin{aligned} w_{\text{max}} &= [1513 - (150 - 14.7)(5.785)(144/778)] \\ &\quad - [1259 - (60 - 14.7)(8.881)(144/778)] - (537)(1.875 - 1.742) \\ &= 130\text{Btu/lb}_m \end{aligned}$$

13. 65^D 蒸汽在 10bar、500K 所占据的体积是 2m³, 环境条件是 1bar、298.15K, 如果蒸汽被加热至 5bar、1000K, 熵(kJ)将改变多少?

解 和题 13. 63 一样, 有

$$\phi_2 - \phi_1 = [h_2 - (P_2 - P_0)v_2] - [h_1 - (P_1 - P_0)v_1] - T_0(s_2 - s_1)$$

$$= [3987 - (400)(0.922)] - [2891 - (400)(0.221)] - (298.15)(8.659 - 6.823) \\ = 378 \text{ kJ/kg}$$

蒸汽的质量为

$$m = V_1/v_1 = (2 \text{ m}^3)/(0.221 \text{ m}^3/\text{kg}) = 9.05 \text{ kg}$$

因此

$$\Delta \Psi = m \Delta \phi = (9.05)(378) = 3421 \text{ kJ}$$

13. 66^D 150 psia、1000°F 的蒸汽, 所占据的体积为 5 ft³, 环境条件是 14.7 psia、77°F, 若将其冷却至 15 psia、500°F, 焓(Btu)的改变将是多少?

解 如同题 13. 64, 有

$$\begin{aligned} \phi_2 - \phi_1 &= [h_2 - (P_2 - P_0)v_2] - [h_1 - (P_1 - P_0)v_1] - T_0(s_2 - s_1) \\ &= [1287 - (15 - 14.7)(37.99)(144/778)] \\ &\quad - [1531 - (150 - 14.7)(5.758)(144/778)] - (537)(1.927 - 1.875) \\ &= -90 \text{ Btu/lb}_m \end{aligned}$$

蒸汽的质量是

$$m = V_1/v_1 = (5 \text{ ft}^3)/(5.758 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) = 0.868 \text{ lb}_m$$

因此

$$\Delta \Psi = m \Delta \phi = (0.868)(-90) = -78 \text{ Btu/lb}_m$$

13. 67^D 100°C 的干饱和蒸汽冷凝到相同温度下的冷凝液体, 计算焓(kJ/kg)的变化, 假定环境条件为标准状况(P_0, T_0).

解

$$\begin{aligned} \phi_2 - \phi_1 &= (u_2 - u_1) - P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) \\ &= (419 - 2306) + (101.325)(0.001 - 1.679) - 298.15(1.307 - 7.356) \\ &= -453 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

13. 68 利用吉布斯函数, 重解题 13. 67.

解 对在(P_0, T)状态下的相变, 有

$$0 = \Delta g = \Delta u + P_0 \Delta v - T \Delta s$$

因此,

$$\Delta \phi = T \Delta s - T_0 \Delta s = (T - T_0) \Delta s = (75)(1.307 - 7.356) = -454 \text{ kJ/kg}$$

13. 69^D 按 USCS 制重解题 13. 67.

解

$$\begin{aligned} \Delta \phi &= (180 - 1078) + (14.696)(0.02 - 26.8)(144/178) - (537)(0.312 - 1.757) \\ &= -195 \text{ Btu/lb}_m \end{aligned}$$

13. 70^D 按 USCS 制重解题 13. 68.

解

$$\Delta \phi = (T - T_0) \Delta s = (9/5)(75)(0.312 - 1.757) = -195 \text{ Btu/lb}_m$$

13. 71 两个完全相同的不可压缩物体, 每一个的质量都是 m , 比热容都是 c , 初始温度分别为 T_1 和 T_2 , 然后在一个与外界隔绝的容器内换热, 证明系统的熵变化是

$$\Delta \Psi = mcT_0 \ln \left[1 - \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \right)^2 \right] < 0$$

解

$$\begin{aligned} \Delta \Psi &= m(\Delta \phi_1 + \Delta \phi_2) = m[(\Delta u_1 + P_0 \Delta v_1 - T_0 \Delta s_1) + (\Delta u_2 + P_0 \Delta v_2 - T_0 \Delta s_2)] \\ &= \Delta U + P_0 \Delta V - mT_0(\Delta s_1 + \Delta s_2) \end{aligned}$$

由第一定律:

$$0 + 0 = \Delta U = mc(T_f - T_1) + mc(T_f - T_2)$$

由此得到平衡温度 $T_f = (T_1 + T_2)/2$, 因此, 熵的变化为

$$\Delta s_1 = c \ln T_f / T_1 = c \ln [(T_1 + T_2)/2T_1]$$

$$\Delta s_2 = c \ln T_1/T_2 = c \ln[(T_1 + T_2)/2T_2]$$

最后,对不可压缩物体 $\Delta V=0$,所以,

$$\Delta \Psi = -mcT_0 \ln \frac{(T_1 + T_2)^2}{4T_1T_2} = mcT_0 \ln \left[1 - \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \right)^2 \right]$$

13.72 证明题 13.71 的结果与高乌-斯托多拉方程(题 13.55)是一致的。

解 可以发现,在题 13.71 中有 $\Delta \Psi = -mT_0(\Delta s_1 + \Delta s_2) = -T_0\Delta s$,这恰好就是高乌-斯托多拉方程。

开放系统的焓

13.73 理想气体在大气环境(P_0, T_0)下流入体积为 V 的初始为真空的容器,证明其焓的变化为 $-(P_0 V \ln k)/(k-1)$,式中 $k=c_p/c_v$ 。

解 对初始为真空的容器, $U=0, S=0, V=V$,而在“死态” $U_0=0, S_0=0, V_0=0$,因此,

$$\Psi_1 = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) = P_0V$$

而最后的焓为

$$\Psi_2 = m_2[(u_2 - u_0) + P_0(v_2 - v_0) - T_0(s_2 - s_0)]$$

现在,由于 $P_2 = P_0$

$$(u_2 + P_0v_2) - (u_0 + P_0v_0) = h_2 - h_0 = c_p(T_2 - T_0) = c_p(k-1)T_0$$

(参见 5.169 题)另一方面,由 Tds 方程得

$$s_2 - s_0 = c_p \ln(T_2/T_0) - R \ln(P_2/P_0) = c_p \ln k$$

这样

$$\Psi_2 = m_2 c_p n [(k-1)T_0 - T_0 \ln k]$$

而由理想气体公式和 $T_2 = kT_0$,得

$$m_2 c_p = P_0 V / (k-1)T_0$$

因此,

$$\Psi_2 - \Psi_1 = P_0 V \left\{ \frac{1}{(k-1)T_0} [(k-1)T_0 - T_0 \ln k] - 1 \right\} = -\frac{P_0 V}{k-1} \ln k$$

13.74 定义戴瑞斯(Darrieus)函数。

解 对稳定流动,将在题 13.54 给出的输出功

$$w = (u - T_0 s) - (u_0 - T_0 s_0)$$

的基础上,再叠加上附加的流动功 $Pv = P_0 v_0$,由此可得戴瑞斯函数

$$d = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0)$$

对于一个使系统由状态 1 变为状态 2 的流动过程,

$$\Delta d = \Delta h - T_0 \Delta s$$

13.75^D 蒸汽以 10kg/s 的流率流过一系统,进口条件是 25bar、1000K,出口条件是 1bar、500K,若假定环境温度为 25°C,所能得到的最大功(MW)是多少?

解 最大功(kJ/kg)就是戴瑞斯函数的减少:

$$d_{in} - d_{out} = (h_{in} - h_{out}) - T_0(s_{in} - s_{out}) = (3976 - 2929) - (298.2)(7.906 - 7.944) = 1059 \text{ kJ/kg}$$

因此,最大功是

$$(10 \text{ kJ/s})(1059 \text{ kJ/kg}) = 10.59 \text{ MW}$$

13.76^D 蒸汽以 20lb_m/sec 的流率流过一系统,进口条件是 500psia, 1000°F;出口条件是 20psia, 300°F,若假定环境温度是 77°F,所能得到的最大功(hp)是多少?

解 在出口处:

$$d_2 = 1191 - 537(1.781) = 235 \text{ Btu/lb}_m$$

在入口处:

$$d_1 = 1521 - 537(1.737) = 588 \text{ Btu/lb}_m$$

因此,

$$\dot{W}_{\max} = \dot{m}(d_1 - d_2) = (20 \text{ lb}_m/\text{sec})(353 \text{ Btu/lb}_m) = 7060 \text{ Btu/sec} = 167 \text{ hp}$$

13.77 布雷顿循环(图 7-24)工作在下述条件下,输入参数(P_1, T_1),最高参数(P_3, T_3),环

境参数(P_0, T_0), 如果无压缩和膨胀的损失, 证明第二定律热力学效率为

$$\eta_{II} = \frac{\eta_I}{1 - [T_0/(T_3 - T_2)] \ln(T_3/T_2)}$$

式中第一定律效率 η_I 如题 7.119, 并假定是理想气体.

解 [由图 7-24] 可以求得 $w_1 = h_4 - h_3 = c_p(T_4 - T_3)$, $w_2 = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$. 输出的功为

$$w_{net} = w_1 - w_2 = c_p(T_3 - T_4 - T_2 + T_1)$$

所加入的烟(即输入的可再生功)是

$$\Delta d = d_1 - d_2 = (h_3 - h_2) - T_0(s_3 - s_2)$$

利用 Tds 方程式, 有

$$P_3 = P_2, \Delta d = c_p[(T_3 - T_2) - T_0 \ln(T_3/T_2)]$$

由定义 $\eta_{II} = w_{net}/\Delta d$, 求出此比值, 分子、分母同除 $(T_3 - T_2)$ 即得上述结果.

- 13.78^D 计算工作在 1bar, 300K 和 5bar, 1000K 之间的理想气体的布雷顿循环的第一定律和第二定律效率. 环境温度是 25°C.

解 利用题 7.120 的结果,

$$T_1 = 300\text{K}, \quad T_2 = 476\text{K}, \quad T_3 = 1000\text{K}, \quad T_4 = 631\text{K}$$

题 13.77 给出

$$\eta_I = 1 - \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{631 - 300}{1000 - 476} = 36.8\%$$

$$\eta_{II} = \frac{\eta_I}{1 - [T_0/(T_3 - T_2)] \ln(T_3/T_2)} = \frac{0.368}{1 - (298.15/524) \ln(1000/476)} = 63.8\%$$

- 13.79^D 计算工作在 15 psia, 40°F 和 1000 psia, 1340°F 之间的半完全气体的布雷顿循环的第一定律和第二定律效率.

解 按照图 7-25 所示的系统,

$$P_1 = P_2 = 15 \text{ psia}, \quad T_1 = 40 + 460 = 500^\circ\text{R}$$

从 1 到 2,

$$P_2 = P_1(P_2/P_1) = (1.868)(100/15) = 12.45$$

因此,

$$h_{2s} = 206.0 \text{ Btu/lb}_m, \quad w_2 = h_{2s} - h_1 = 86.5 \text{ Btu/lb}_m$$

另一方面,

$$T_3 = 1340 + 460 = 1800^\circ\text{R}$$

从 3 到 4,

$$P_4 = P_3(P_4/P_3) = (201.9)(15/100) = 30.29$$

因此,

$$h_4 = 265.8 \text{ Btu/lb}_m, \quad w_1 = h_4 - h_3 = 265.8 - 449.9 = -184.1 \text{ Btu/lb}_m$$

净输出功为 $w_{net} = 97.6 \text{ Btu/lb}_m$.

另外, $q_h = h_3 - h_{2s} = 243.9 \text{ Btu/lb}_m$, 故

$$\eta_I = w_{net}/q_h = 97.6/243.9 = 40.0\%$$

流体烟的增量为

$$\Delta d = \Delta h - T_0 \Delta s = (h_3 - h_{2s}) - T_0(s_3 - s_{2s})$$

现在

$$s_3 = s_3^0 - R \ln P_3 = 1.943 - 0.0686 \ln 100 = 1.627 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

$$s_{2s} = s_1 = s_1^0 - R \ln P_1 = 1.622 - 0.0686 \ln 15 = 1.436 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$$

因此,

$$\Delta d = 243.9 - (537)(1.627 - 1.436) = 141.3 \text{ Btu/lb}_m$$

$$\eta_{II} = w_{net}/\Delta d = 97.6/141.3 = 69.1\%$$

- 13.80 利用题 13.77 结果验算题 13.79.

解

$$\eta_I = 1 - \frac{1098 - 500}{1800 - 858} = 36.5\%$$

$$\eta_{II} = 1 - \frac{0.365}{1 - (537/942) \ln(1800/858)} = 63.1\%$$

第十四章 增补题

第一章

- 14.1 一学生用一纯数记一压强, 没有注意其单位是 bar 还是 psig, 这一疏忽只对一个压强是无关紧要的, 这个压强是多少?

解 设 bar 和 psia 之间的换算关系是 $P(\text{bar}) = P(\text{psia})/14.504$, 而 $P(\text{psig}) = P(\text{psia}) - 14.696$. 因此, $P(\text{bar}) = [P(\text{psig}) + 14.696]/14.504 = (0.06895)P(\text{psig}) + 1.01325$. 如果 bar 的数值和 psig 完全相同, 则 $P = 0.06895P + 1.01325$, 即 $P = 1.08828\text{bar} = 1.08828\text{psig}$.

- 14.2^D $191\text{N} \cdot \text{m}$ 的转矩使一轴每分钟转 50 圈, 该轴传递了多少功(kW)?

解 功 = (转矩) \times (角速度) = $(191)(50)(2\pi/60) = 1000\text{N} \cdot \text{m/s} = 1\text{kJ/s} = 1\text{kW}$.

- 14.3^D $5.25\text{ft} \cdot \text{lb}_f$ 的转矩使一轴每分钟旋转 1000 圈, 传递了多少功(hp)?

解 功 = (转矩) \times (角速度) = $(5.25)(1000)(2\pi/60) = 550\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{sec} = 1\text{hp}$.

- 14.4 在南极的一个早晨, 华氏温度计和摄氏温度计具有相同的读数, 此温度为多少?

解 $T(^{\circ}\text{F}) = (9/5)T(^{\circ}\text{C}) + 32$, $T = (9/5)T + 32$, $T = -40^{\circ}\text{F} = -40^{\circ}\text{C}$

- 14.5 某一学热力学学生称, 她以 2 赫兹/屈光率单位的速度行走, 她是否疯了?

解 也许是, 虽然 2m/s 的速度似乎是合理的.

第二章

- 14.6 加热刚性容器中的理想气体, 以至于 $T_2 > T_1$, $P_2 > P_1$. 图 14-1 中的哪条路径代表这一过程?

解 路径 D.

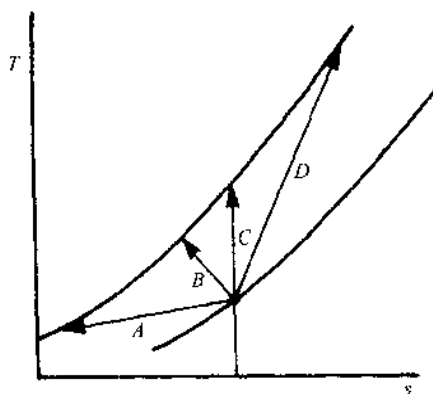


图 14-1

- 14.7^D 空气从 10bar, 600K 等熵地膨胀至 1bar, 计算其终了温度. 假定比热与温度的关系为 $c_p = 1.00205 - (1.62983 \times 10^{-4})T + (5.69525 \times 10^{-7})T^2 - (2.68081 \times 10^{-10})T^3$ 式中 T 的单位是 K, c_p 的单位是 $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$.

解 若

$$\Delta s = \int c_p \left(\frac{dT}{T} \right) - R \left(\frac{dP}{P} \right) = 0$$

则

$$\int_{T_1}^{T_2} c_p \left(\frac{dT}{T} \right) = R \ln \frac{P_2}{P_1} = 0.28704 \ln 0.1 = -0.66693$$

代入给定的 c_p 多项式并逐项积分, 可得下列关于 T_2 的方程:

$$f(T_2) = -1.00205(\ln T_2) - (1.62983 \times 10^{-4}) T_2 + (2.84763 \times 10^{-7}) T_2^2 \\ - (8.93603 \times 10^{-11}) T_2^4 - 5.76503 = 0$$

空气特性表中值可用来计算一级近似值, 由 $P_{r2} = P_{r1}(P_2/P_1)$, 可得 $P_{r2} = (28.81)(1/10) = 2.881$, 故 $T_2 \approx 311\text{K}$, 代入前式得

$$f(311) = 5.75156 - 0.05069 + 0.02754 - 0.00269 - 5.76503 = 0.03931 \text{ (太大)}$$

试 310K ,

$$f(310) = 5.74833 - 0.05052 + 0.02737 - 0.00266 - 5.76503 = 0.04251 \text{ (更错)}$$

降低 1K 温度增加函数值 0.00320 , 因此, 下一个猜测值为

$$T = 311 + 0.03931/0.00320 = 323\text{K}$$

$$f(323) = 5.78950 - 0.05264 + 0.02971 - 0.00301 - 5.76503 = -0.00147 \text{ (现在太小了)}$$

因为 $f(322) = +0.00457$, 所以最终温度为 323K .

- 14.8^D 空气从 100psia , 1500°R 等熵地膨胀至 40psia , 计算其终了温度. 利用

$$R = 0.0685 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$$

$$c_p = 0.02392 - (6.8 \times 10^{-6}) T + (1.567 \times 10^{-8}) T^2$$

(T 的单位为 $^\circ\text{R}$, c_p 的单位为 $\text{Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R}$). [提示: 图表显示终了温度在 1100°R 和 1200°R 之间]

解 解

$$\Delta s = \int c_p \left(\frac{dT}{T} \right) - R \left(\frac{dP}{P} \right) = 0$$

代入 c_p 表达式, 逐项积分并整理得

$$\ln T_f = (2.8428 \times 10^{-5}) T_f - (3.2755 \times 10^{-8}) T_f^2 + 7.2822$$

用尝试法解得

$$T_f \approx 1175^\circ\text{R}$$

- 14.9 当温度高于 500K 时, 是否有简便的方法记住稀薄气体的焓随温度的变化.

解 解 有. 对稀薄(即理想)气体,

$$c_p = (7/2)R = (7/2)(0.28704) = 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

因此

$$h(\text{kJ/kg}) = c_p T \approx T(\text{K})$$

- 14.10 按照一些热力学试验, 空气特性表给出的比热容比采用恒定比热容更准确, 但为什么后者仍然被采用.

解 解 为了快速地估算.

- 14.11 是否积分 $-\int PdV$ 的结果总是功(对系统作的功)?

解 解 不是. 此结论仅适用于非流动过程.

- 14.12 是否两个独立的热力学特性参数, 就能完全确定一纯物质的状态?

解 解 不是. 对一个汽-液两相共存的混合物就不行.

- 14.13 对理想气体方程式 $\Delta U = m \int_{T_1}^{T_2} c_p dT$ 作出评价.

解 解 此方程有错误. 合适的比热容应为 c_v .

- 14.14 一不可逆过程能是绝热的吗?

解 解 第二定律不排斥不可逆绝热过程, 虽然这和所描述的不可逆过程不完全一样. 但是, 节流阀(题 5.151)就是此过程的一个实际例子.

- 14.15 在一不可逆过程中, 是否熵的变化总是为零或正?

解 解 是的, 实际上总是正的.

- 14.16 用一泵非常缓慢地压缩一理想气体, 以至于可将此过程视为等温过程. 然后让气体膨胀去驱动一桨轮(曲轴轮), 能得到与输入相等的输出功吗?

解 解 若在系统中有任何不可逆过程(但总是有的)就不能.

- 14.17 T - s 图上的面积总是代表所传递的热量, 这种表述对吗?

解 这种表述仅对可逆过程是正确的。

- 14.18 饱和蒸汽和饱和液体的体积是否总是不同?

解 是的,除了在临界点。

- 14.19 方程 $T/dT = dh - vdP$ 适用于: (i) 任何过程; (ii) 仅为等容过程; (iii) 仅为可逆过程。

解 (iii) 正确, 参见题 2.324。

- 14.20 $c_p = c_v + R$, 可应用于: (i) 理想气体; (ii) 所有纯物质; (iii) 两相共存状态; (iv) 上述三个无一适用; (v) 上述三个都适用。

解 (i) 正确。

- 14.21 对理想气体, 下述表述中哪个不正确? (i) $c_p = c_v + R$; (ii) $c_p = R[k/(k-1)]$; (iii) $c_v = R[(1/k)-1]$; (iv) $k = c_p/c_v$ 。

解 (iii) 不正确, 应为 $c_v = R[1/(k-1)]$ 。

- 14.22 “空气特性表”的构成是基于这样的假设: (i) 在等压、等容下的比热在通常范围内仅是温度的函数; (ii) 空气的焓、熵和内能是压强和温度的函数; (iii) 空气的特性是按饱和线附近的值估计的。

解 (i) 正确。

- 14.23 一气体按照由方程 $PV = a + bV$ 所决定的路线改变状态, 式中 a, b 为正常数。在 $P-V$ 图上什么形状的曲线代表这一过程? (i) 双曲线; (ii) 椭圆; (iii) 对数线; (iv) 直线; (v) U-型线。

解 (i) 正确。

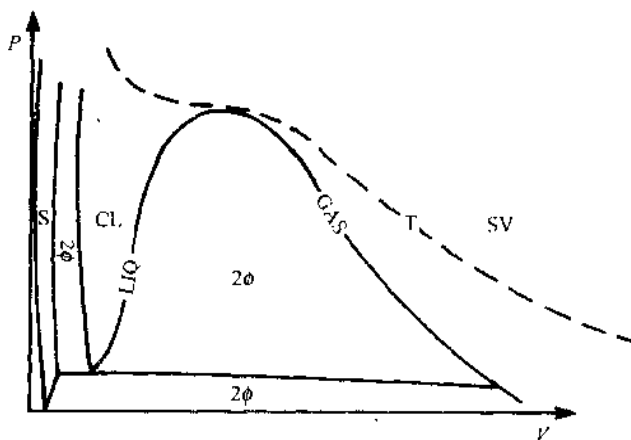


图 14-2

- 14.24 在 $P-V$ 图上, 标示出以下各区域: 过热蒸汽区 (SV); 两相共存区 (2φ); 过冷液体区 (CL); 固体区 (S); 饱和蒸汽线 (GAS); 饱和液体线 (LIQ); 临界等温线 (T)。

解 见图 14-2。

- 14.25 在 $h-T$ 图上, 标出: (a) 饱和液体边界; (b) 饱和气体边界; (c) 临界点; (d) 理想气体曲线; (e) 汽-液两相区。

解 见图 14-3。

- 14.26 参见图 14-3, 理想气体曲线似乎代表了所有实际气体的上限, 是否是这样?

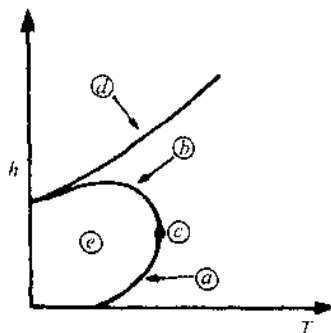


图 14-3

解 不是. 如果实际气体服从雷纳德-琼斯(Lennard-Jones)分子间相互作用势, 则可从表上数据推出, 当折合温度 kT/ϵ 大于 6.5, 实际气体将处在更高的压强下. 然而, 就总体而言, 该曲线总结得很好.

14. 27^D 浸水蔬菜可以是不正确使用压力锅的结果. 一厨师将 20°C , 0.1kg 的水放入压力锅, 这些水占据了整个锅的 1% 体积, 然后加入蔬菜 (体积未知, 假定可忽略) 旋紧盖子, 加热压力锅. 忽略大气压和压力锅膨胀等的影响. (a) 要蒸发这些水, 必须加多少热 (kJ)? (b) 最终压强是多少 bar?

解 (b) 令 $V = V_f(\text{液}) + V_g(\text{气})$, 在 20°C , $v_f \approx 1.002 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, $m_f = 0.1\text{kg}$, 故 $V_f = m_f v_f = (0.1)(1.002 \times 10^{-3}) = 1.002 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. 若它占据了压力锅总体积的 1%, 则 $V = 1.002 \times 10^{-2} \text{ m}^3$, $V_g = (99)(1.002 \times 10^{-4}) = 9.92 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. 而在 20°C , $v_g \approx 57.8 \text{ m}^3/\text{kg}$, $m_g = V_g/v_g = (9.92 \times 10^{-3})/57.8 \approx 1.72 \times 10^{-4} \text{ kg}$, $m = m_f + m_g \approx 0.1 + (1.72 \times 10^{-4}) = 0.10017\text{kg}$. 因此, $v_{\text{混合}} = V/m = 0.01002/0.10017 \approx 0.10003 \text{ m}^3/\text{kg}$. 液态水将蒸发至 $v_g = v_{\text{混合}} = 0.100 \text{ m}^3/\text{kg}$. 由表 A4, 这相当于压强为 20bar.

(a) $Q = m\Delta u \approx (0.1)(2598 - 84) = 251\text{kJ}$, 忽略原有的极少量水蒸气.

14. 28^D 若在 70°F 下, 1.5 品脱 (pint) 的液态水占据了 5% 的压力锅, 重解题 14. 27, 求 (a) 所加的热 (Btu); (b) 最终压强 (psia).

解 (b) 在 70°F , $v_f = 0.01605 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, 1 品脱 (pint) 水为 1 磅 (lb_m), 故 $m_f = 1.5 \text{ lb}_m$, $V_f = m_f v_f = (1.5)(0.01605) = 0.0241 \text{ ft}^3$. 此为总体积的 5%, 故 $V = 0.482 \text{ ft}^3$. 而蒸汽的质量为 $V_g/v_g = [(0.482 - 0.024) \text{ ft}^3]/(920 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) = 0.0005 \text{ lb}_m$, 可忽略 (参见题 14. 27). 加热后 $v_g = v_{\text{混合}} = V/m_f = 0.482/1.5 = 0.321 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 表 3 显示此时温度为 583°F , 压强为 1373psia.

(a) $Q = m\Delta u = (1.5)(588) = 882\text{Btu}$.

14. 29^D 一系统包含 0.136kg , 干度为 0.2 的水和 0.181kg 的空气. 若系统温度为 350K , 求 (a) 体积 (m^3); (b) 系统的压强 (bar).

解 (a) 湿蒸汽的液体分数 $m_f = (1-x)m = (0.8)(0.136) = 0.109\text{kg}$, 由于 $v_f = 0.001027 \text{ m}^3/\text{kg}$, $V_f = m_f v_f = (0.109)(0.001027) = 1.07 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. 气体部分, $m_g = xm = (0.2)(0.136) = 0.0272\text{m}^3$, $V_g = m_g v_g = (0.0272)(3.846) = 0.1046 \text{ m}^3$. 气态水, 液态水占据的总体积为 $0.1046 + 0.0001 = 0.1047 \text{ m}^3$. 这就是系统的体积.

(b) 利用空气的理想气体方程 $P = mRT/V = (0.181)(0.2871)(350)/0.1046 = 173.9\text{kPa} = 1.739\text{bar}$, 所以系统总压强为 $1.739 + 0.416 = 2.155\text{bar}$, 式中的 0.416bar 是 350K 下的饱和蒸汽压强 (由表 A2). 注意假定压强具有可加性.

14. 30^D 一容器包含 0.3 lb_m , 干度为 25% 的水和 0.5 lb_m 空气, 温度是 200°F . 求: (a) 体积 (ft^3); (b) 容器内的压强 (psia).

解 (a) 液体的质量是 $(1-x)m = (1-0.25)(0.3) = 0.225 \text{ lb}_m$, 利用表 A1, $V_f = m_f v_f = (0.225 \text{ lb}_m)(0.01664 \text{ ft}^3/\text{lb}_m) = 0.0037 \text{ ft}^3$. 同样, $V_g = m_g v_g = xmv_g = (0.25)(0.3)33.6 = 2.52 \text{ ft}^3$, 总体积大约是 2.52 ft^3 (由于 v_g 仅给出小数点后一位).

(b) 利用理想气体状态方程, $P = mR_u T/MV = (0.5 \text{ lb}_m)(1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m \cdot \text{mole}^\circ\text{R})(660)^\circ\text{R}/[(28.97 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \cdot \text{mole})(2.52 \text{ ft}^3)] = 6984 \text{ lb}_f/\text{ft}^2 = 48.5 \text{ psia}$, 由表 A1, 饱和蒸汽压为 11.5psia , 因此, 假定压强具有可加性, 得总压强为 $48.5 + 11.5 = 60\text{psia}$.

14. 31 一纯物质的汽-液混合物的比热容是多少?

解 对蒸发和冷凝, 可以恒温 ($dT=0$) 下传热, 因此 $c = dQ/dT$ 为无穷大.

14. 32^D 你在班上宣布, 你将需要液态水在 100bar , 20°C 下的焓值. 但当你寻找水蒸气表时, 你发现由于粗心忘带了. 你能否提供一个粗略的估计值 (kJ/kg) 以满足你的学生?

解 能. 因 $h = u + Pv$, 则 $dh/dP = du/dP + P(dv/dP) + v$. 现假定水不可压缩, 故 $dv/dP = 0$. 另一方面, 内能仅是温度的函数, 因此 $du/dP = 0$, 则 $dh/dP = v$, 即 $\Delta h \approx v_f \Delta P$, 但 $v_f \approx 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ($= 1\text{cm}^3/\text{g}$), $\Delta P = (100\text{bar}) - P_{\text{饱和}}$, 而 $P_{\text{饱和}} \approx 0$. 由于水在 100°C 沸腾, 因此, $\Delta h \approx (100 \times 100\text{kPa}) \cdot$

$(10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}) = 10 \text{ kJ/kg}$, 这就是由压缩引起的焓的增量。

水从三相点开始加热, 在三相点 $h_f = 0$, 你记得水的比热容大约为 $1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ 或 $4.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 因此, 加热所产生的焓的变化为 $\Delta h = c\Delta T = (4.18)(20 - 0) = 83.6 \text{ kJ/kg}$, 所以你的最终结果为 93.6 kJ/kg , 课后, 从蒸汽图表上发现, 该数值为 93.3 kJ/kg 。

14.33^D 采用求解题 14.32 类似的方法, 估计液态水在 $1500 \text{ psia}, 100^\circ\text{F}$ 下的焓。

解 由于水的密度大约为 $62.4 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$, 则比体积大约为 $1/62.4 = 0.01603 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, 故 $\Delta h = v_f \Delta P \approx (0.01603 \text{ ft}^3/\text{lb}_m)(1500 \text{ lb}_f/\text{in}^2)(144 \text{ in}^2/\text{ft}^2)/(778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu}) = 4.4 \text{ Btu}/\text{lb}_m$ 。水必须从三相点 (32°F) 加热到 100°F , 利用比热 $c = 1 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{F}$, 计算得所需能量为 $c\Delta T = (1)(100 - 32) = 68 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, 加上 4.4, 可预见焓为 $72.4 \text{ Btu}/\text{lb}_m$, 而蒸汽表上的值为 $72.0 \text{ Btu}/\text{lb}_m$ 。

14.34 下列陈述中哪一条为被压缩液体的特征? (i) 它的温度低于相应压强下的饱和温度; (ii) 它的压强低于相应温度下的饱和压强; (iii) 它的温度高于相应压强下的饱和温度。

解 (i) 正确。

14.35 为什么题 14.34(ii) 和 (iii) 两个条件不可能成立?

解 在任何一个条件下, 液体都将会完全蒸发。

14.36 对确定 (a) 功、(b) 热流, 哪种热力学图更有用?

解 (a) 任何焓作坐标的图。

(b) T - s 图, 因对可逆过程 $q = \int Tds$, 而某些情况下 (例: 在一具有边界功的封闭系统中的等压变化), 可用焓作坐标的图求解。

第三章

14.37^D 2 公斤 $c_p = 0.895 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 和 $c_v = 0.706 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 的理想气体装在一绝热的刚性容器内, 其压强、温度分别为 2 bar 和 400 K , 用一由外置马达驱动的搅拌机搅拌, 使其压强升至 4 bar , 试确定: (a) 最终温度 (K); (b) 内能的变化 (kJ); (c) 焓的变化 (kJ); (d) 传热量 (kJ); (e) 所做的功 (kJ)。

解 (a) 对等容下的理想气体 $T_2 = T_1 (P_2/P_1) = (400)(4/2) = 800 \text{ K}$

(b) $\Delta U = m c_v \Delta T = (2 \text{ kg})(0.706 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})[(800 - 400) \text{ K}] = 565 \text{ kJ}$

(c) $\Delta H = m c_p \Delta T = (2 \text{ kg})(0.895 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})[(800 - 400) \text{ K}] = 716 \text{ kJ}$

(d) 由于容器是绝热的, 故 $Q = 0 \text{ kJ}$

(e) 由第一定律 $W = \Delta U - Q = 565 \text{ kJ}$

14.38^D 现在题 14.37 中系统的绝热装置被拆除, 随着搅拌的停止, 气体将被冷却至 400 K 。在此过程中, 试确定: (a) 内能的变化 (kJ); (b) 焓的变化 (kJ); (c) 所做的功 (kJ); (d) 传热量 (kJ); (e) 最终压强 (bar)。

解 (a) $\Delta U = -565 \text{ kJ}$ (状态函数)

(b) $\Delta H = -716 \text{ kJ}$ (状态函数)

(c) $W = \int P dV = 0$

(d) $Q = \Delta U - W = -565 \text{ kJ}$

(e) $P_2 = 2 \text{ bar}$ (状态函数)

14.39^D 5 磅 $c_p = 0.240 \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{R}$, $c_v = 0.171 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 的理想气体装在一绝热的刚性容器内, 其压强、温度分别为 15 psia 和 70°F 。容器中的电阻消耗能量使气体压强升到 30 psia , 试确定 (a) 最终温度 ($^\circ\text{F}$); (b) 内能的变化 (Btu); (c) 焓的变化 (Btu); (d) 所做的功 (Btu); (e) 容器中的传热量 (Btu)。

解 (a) 对等容下的理想气体, $T_2 = T_1 (P_2/P_1) = (70 + 460)(30/15) = 1060^\circ\text{R} = 600^\circ\text{F}$

(b) $\Delta U = m c_v \Delta T = (5 \text{ lb}_m)(0.171 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R})[(1060 - 530)^\circ\text{R}] = 453 \text{ Btu}$

$$(c) \quad \Delta H = m c_p \Delta T = (5 \text{ lb}_m) (0.240 \text{ Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R}) [(1060 - 530) ^\circ\text{R}] = 636 \text{ Btu}$$

$$(d) \quad W = 0 \text{ Btu}$$

$$(e) \quad Q = \Delta U + W = 453 \text{ Btu}$$

- 14.40^D 题 14.39 中的刚性容器现与一完全相同,但初始真空的容器相连,30psia 的气体通过膨胀充满两个容器,压强降至 15psia.若在此过程中,电阻器不消耗能量,试确定:(a) 最终温度($^\circ\text{F}$);(b)内能的变化(Btu).

解 题 (a) 对于体积扩大一倍而压强减半,温度仍保持在 600 $^\circ\text{F}$.

$$(b) \quad \Delta U = m c_v \Delta T = 0$$

- 14.41^D 一活塞式动力装置,气缸内包含空气,其初始压强、体积、温度分别为 5bar, 1m^3 和 77 $^\circ\text{C}$.在恒压下传热使体积扩大一倍.然而由于内部摩擦,空气膨胀的实际做功仅为 400kJ.若将空气视为半完全气体,试确定:(a)空气的质量(kg);(b)内能的变化(kJ);(c)焓的变化(kJ);(d)传热量(kJ);(e)摩擦损失的功(kJ).

$$\text{解 题 (a)} \quad m = MPV/R_o T = (28.97)(500)(1)/(8.314)(350) = 4.98 \text{ kg}$$

$$(b) \Delta U = m \Delta u, \text{ 对等压过程, } T_2 = T_1 (V_2/V_1) = 350(2/1) = 700\text{K, 由表 B2 查得}$$

$$\Delta U = (4.98)(512.9 - 250.1) = 1309 \text{ kJ}$$

$$(c) \quad \Delta H = m \Delta h = (4.98)(713.8 - 350.5) = 1809 \text{ kJ}$$

$$(d) Q = \Delta U + W = 1309 - (-400) = 1709 \text{ kJ, 由于 } Q > 0, \text{ 热量传给空气.}$$

$$(e) \text{ 膨胀作功 } -P\Delta V = -(500 \text{ kPa})[(2-1)\text{m}^3] = -500 \text{ kJ. 这 } 500 \text{ kJ 的功是活塞膨胀所做的功, 而对外做的功仅为 } 400 \text{ kJ, 因此, 内部摩擦损耗了 } 100 \text{ kJ.}$$

- 14.42^D 一活塞式动力装置,气缸内包含空气,其初始压强、体积、温度分别为 20psia, 2ft^3 和 60 $^\circ\text{F}$.在恒压下传热使体积为初始的 80%.由于内部摩擦,压缩空气需做功 2Btu.若将空气视为半完全气体,试确定:(a)空气的质量(lb_m);(b)内能的变化(Btu);(c)焓的变化(Btu);(d)传热量(kJ);(e)摩擦消耗的功(kJ).

$$\text{解 题 (a)} \quad m = MPV/R_o T = (28.97)(20 \times 144)(2)/(1545)(520) = 0.208 \text{ lb}_m$$

$$(b) \Delta U = m \Delta u; T_2 = T_1 (V_2/V_1) = (520)(0.80) = 416^\circ\text{R, 则}$$

$$\Delta U = (0.208)(70.79 - 88.62) = -3.71 \text{ Btu}$$

$$(c) \quad \Delta H = m \Delta h = (0.208)(99.29 - 124.2) = -5.18 \text{ Btu}$$

$$(d) Q = \Delta U + W = -3.71 - 2 = -5.71 \text{ Btu, 由装置向外传热.}$$

$$(e) \text{ 压缩的功为 } -P\Delta V = -(20)(1.6 - 2)(144/778) = 1.48 \text{ Btu, 因此, } 2 - 1.48 = 0.52 \text{ Btu 是摩擦消耗的能量.}$$

- 14.43^D 蒸汽从 6bar, 250 $^\circ\text{C}$, 按照规律 $Pv^{1.3} = \text{常数}$ 膨胀至 1bar, 计算每千克蒸汽所做的功(kJ/kg).

$$\text{解 题 由题 3.19(b), } w = (P_2 v_2 - P_1 v_1)/(n-1), \text{ 式中 } n = 1.3. \text{ 从表 A5 得在 6bar 下, } v_1 = 0.375 + (23.2/50)(0.416 - 0.375) = 0.394 \text{ m}^3/\text{kg, 则}$$

$$v_2 = v_1 (P_1/P_2)^{1/1.3} = (0.394)(6)^{1/1.3} = 1.5634 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$w = [(100)(1.5634) - (600)(0.394)]/(1.3-1) = -267 \text{ kJ/kg}$$

由于 $w < 0$, 方向是输出.

- 14.44^D 求题 14.43 中每千克蒸汽所传递的热量(kJ/kg), 忽略液体的体积.

$$\text{解 题 } q = \Delta u - w, \text{ 在初始条件下, } u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 2957 - (600)(0.394) = 2721 \text{ kJ/kg; 在终了条件下, } v_2 < v_g, \text{ 故 } 1.5634 = (1-x_2)(1.043 \times 10^{-3}) + x_2(1.694). \text{ 忽略液体体积, } x_2 = 0.9229. \text{ 因此 } u_2 = (1-0.9229)(417.4) + (0.9229)(2506) = 2345 \text{ kJ/kg. 所以}$$

$$q = (2345 - 2721) - (-267) = -109 \text{ kJ/kg}$$

因 $q < 0$, 传热的方向是输出.

- 14.45^D 蒸汽按规律 $Pv^{1.3} = \text{常数}$, 从 100psia, 500 $^\circ\text{F}$ 膨胀至 15psia, 计算每单位质量蒸汽所做的功(Btu/lb_m).

解 题 题 3.19(b)建立的公式 $w = (P_2 v_2 - P_1 v_1)/(n-1)$ 可用于此题. 当 $n = 1.3$ 时, 表 A3 给出

$v_1 = 5.587 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, 故 $v_2 = v_1 (P_1/P_2)^{1/1.3} = (5.587)(100/15)^{1/1.3} = 24.04 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$, 因此,
 $w = [15(24.04) - 100(5.587)](144/778)/(1.3 - 1) = -122.2 \text{ Btu}/\text{lb}_m$

因 $w < 0$, 方向为输出.

14.46^D 求题 14.45 中每单位质量蒸汽的传热量, 忽略液体体积.

解 $q = \Delta u - w$, 在初始条件下, $u_1 = h_1 - P_1 v_1 = 1279 - 100(5.587)(144/778) = 1176 \text{ Btu}/\text{lb}_m$; 与在 15 psia 下的比体积 $24.04 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 相对应, 在 14.7 psia 下的比体积为 $(24.04) \cdot (15/14.77) = 24.53 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$. 由此可查表求汽-液混合物. 因此 $24.53 = (1 - x_2)(0.0167) + x_2(26.79)$, 忽略液体体积, $x_2 = 0.9156$.

则 $u_2 = (1 - x_2)u_f + x_2 u_g \approx (1 - x_2)h_f + x_2(h_g - P v_g)$
 $= (1 - 0.9156)(180.2) + (0.9156)[1151 - (14.7)(26.79)(144/778)] = 1002.4 \text{ Btu}/\text{lb}_m$

所以 $q = (1002 - 1176) - (-122) = -52 \text{ Btu}/\text{lb}_m$

因 $q < 0$, 传热方向是输出.

14.47 对不可逆过程 $1 \rightarrow 2$, $S_2 - S_1$ 和 $\int_1^2 \frac{dQ}{T}$ 之间的关系是什么?

解 $S_2 - S_1 > \int_1^2 \frac{dQ}{T}$

14.48 判断下式正确与否? 对一循环过程 $Q = W$.

解 正确. 所提供的 Q 被认为是输入的热而 W 为输出的功.

14.49 一箱子被一导热膜分成两个小仓. 整个箱子与周围环境是隔绝的. 质量同为 m 的同类半完全气体放在两个小仓内. 一个小仓的温度为 T_1 , 另一个为 T_3 . 若 $c_v = a - bT$ ($a, b > 0$), 计算当两个小仓内气体的温度达到平衡时, 孤立系统熵的变化.

解 将第一定律应用于整个箱子, 有 (T_2 为终了温度)

$$\begin{aligned} 0 + 0 &= \Delta U = m \int_{T_1}^{T_2} (a + bT) dT + m \int_{T_3}^{T_2} (a + bT) dT \\ &= m \left\{ bT_2^2 + 2aT_2 - \left[\frac{b}{2} (T_1^2 + T_3^2) - a(T_1 + T_3) \right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

因此十分明显, 只要我们解出此二次式, T_2 就可求得. 注意, 只有当 $b \rightarrow 0$ (理想气体) 时,

$$T_2 = (T_1 + T_3)/2$$

现假定此为可逆过程, 将第一定律分别应用于两个小仓, 得 $TdS = dU = mc_v dT$, 因此, 熵的净增为

$$\begin{aligned} \Delta S &= m \int_{T_1}^{T_2} (a + bT) dT/T + m \int_{T_3}^{T_2} (a + bT) dT/T \\ &= m [a \ln(T_2/T_1 T_3) + b(2T_2 - T_1 - T_3)] \end{aligned} \quad (2)$$

14.50 证明题 14.49 中的 $\Delta S > 0$.

解 假定 $T_1 < T_2 < T_3$, 对原问题不会引起什么变化. 则题 14.49 方程(1)可改写为

$$\int_{T_1}^{T_2} (a + bT) dT = \int_{T_2}^{T_3} (a + bT) dT$$

由于被积函数是一个严格的增函数, 它在 (T_2, T_3) 之间的平均值大于它在 (T_1, T_2) 之间的平均值, 因此, 若积分值左右相等, 则必有 $T_2 - T_1 > T_3 - T_2$. 现定义 $\Phi(T) \equiv m(a/T + b)$ 为一个正的、但严格的减函数, 则题 14.49 公式(2)为

$$\begin{aligned} \Delta S &= \int_{T_1}^{T_2} \Phi(T) dT - \int_{T_2}^{T_3} \Phi(T) dT > \Phi(T_2)(T_2 - T_1) - \Phi(T_2)(T_3 - T_2) \\ &= \Phi(T_2)[(T_2 - T_1) - (T_3 - T_2)] > 0 \end{aligned}$$

14.51 一理想气体在一封闭系统内通过一可逆、等压过程从 10 ft^3 膨胀至 20 ft^3 , 假定压强为 10 psia, 下列说法中哪一个是正确的? (i) 所做的功为 $100 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$; (ii) 在膨胀过程中温度下降; (iii) 可从给定数据中确定焓 (Btu/lb_m) 的变化; (iv) 在此过程中要给气体加热.

解 (iv) 正确.

14.52 在什么温度下将范德瓦耳斯 (Van der Waals) 气体等温地由 v_1 压缩至 v_2 所需的功

与理想气体所需的相同?

解 若 $P = [RT/(v-b)] - a/v^2$,

则

$$w = - \int_{v_1}^{v_2} P dv = RT \ln[(v_1 - b)/(v_2 - b)] + a(1/v_1 - 1/v_2)$$

由于对理想气体,其结果为 $RT \ln(v_1/v_2)$,两结果要一致,只有

$$\ln\left(\frac{v_1 - b}{v_2 - b}\right) + \frac{a}{RT}\left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}\right) = \ln\left(\frac{v_1}{v_2}\right)$$

即

$$T = \frac{a}{R} \frac{1/v_2 - 1/v_1}{\ln(1 - b/v_1) - \ln(1 - b/v_2)}$$

- 14.53 估算压强在大气压附近,而温度低于饱和温度的水的焓和熵时,你将选择下列方法中的哪一种? (i)利用相同压强下的饱和数据;(ii)利用相同温度下的饱和数据;(iii)利用压缩液体表,并通过线性插值取得.

解 (ii)正确.——参见题3.101.

第四章

- 14.54 水蒸气可将其作为理想气体处理,当(i)所经历的过程无相变;(ii)在临界压强以上;(iii)除了低压情况,在饱和线以上并远离它.

解 (iii)正确.在(i)和(ii)情况下,压缩因数将严重偏离1.

- 14.55 为什么 Z -图表采用折合体积 v_r 而不采用 $v_r \equiv v/v_c$?

解 因临界体积 v_c 在很大程度上不能确定.

- 14.56 判断命题是否正确:所有物质溶化后都会膨胀.

解 错误,冰就是一个例外.

- 14.57 在临界点,干度为(i)零;(ii)单位;(iii)三分之一;(iv)不确定.

解 (iv)正确.

题14.58~14.62可参见图14-4.

- 14.58 A点是_____.

解 三相点.

- 14.59 B点是_____.

解 临界点.

- 14.60 曲线C标示的是_____边界.

解 液-固.

- 14.61 曲线D标示的是_____边界.

解 汽-固.

- 14.62 E点代表什么?

解 干度 $0 < x < 1$ 的汽-液混合物.

- 14.63 若温度超过临界温度还有物质以固态形式存在吗?

解 有(意想不到).

- 14.64 判断命题是否正确:压缩因数图是总结性的,故可应用于大多数具有一般化学结构的气体.

解 此说法有错误.

- 14.65^D 假定氨具有下列参数(T 用K作单位): (i)饱和蒸汽压(Pa), $\ln P_{\text{饱和}} = 21.84 - [2132.5/(T - 32.98)]$; (ii)蒸发焓(kJ/kg) $= 2105.3 - 3.086T$; (iii)液体的密度 =

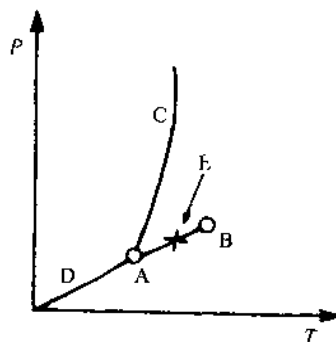


图 14-4

$625\text{kg}/\text{m}^3 = \text{常数}$; (iv) 液体的比热容 $= 4.50\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K} = \text{常数}$; (v) 在 $T = 233.15\text{K}$, 饱和液体的焓和熵为零. 用表显示当 $T = 233.15, 240, 260, 280, 300\text{K}$ 时的参数 $P_{\text{饱和}}$, $v_f, v_g, h_f, h_g, s_f, s_g$.

解 饱和蒸汽压强可以很方便地从(i)中的公式求得. 在表 14-1 中已将计算结果由帕(Pa)转换成 bar.

表 14-1

T/K	$P_{\text{饱和}}/\text{bar}$	$v_f/(\text{m}^3/\text{kg})$	$v_g/(\text{m}^3/\text{kg})$	$h_f/(\text{kJ}/\text{kg})$	$h_g/(\text{kJ}/\text{kg})$	$s_f/(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})$	$s_g/(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})$
233.15	0.716	0.0016	1.560	0.0	1386.3	0.000	5.950
240	1.026	0.0016	1.114	31.5	1396.2	0.130	5.816
260	2.544	0.0016	0.478	121.5	1424.4	0.490	5.501
280	5.442	0.0016	0.235	211.5	1452.7	0.824	5.257
300	10.39	0.0016	0.129	301.5	1482.0	1.136	5.086

饱和液体的比体积就是密度的倒数. 饱和液体的焓与(V)相一致, 由公式 $h = c_f(T - 233.15)$ 得. 注意题 4.150 给出的更准确的公式需要额外输入数据.

由克劳修斯-克拉帕龙(Clausius-Clapeyron)方程 $dP_{\text{饱和}}/dT = h_{fg}/[T(v_g - v_f)]$, 结合(i)和(ii), 得到

$$v_g = v_f + \left(\frac{2105.3}{T} - 3.086 \right) \frac{(T - 32.98)^2}{(2132.5)(100P_{\text{饱和}})}$$

当 $P_{\text{饱和}}$ 用 bar 作单位时在等号右边插入 100 这一因子, v_g 的单位为 m^3/kg , 饱和蒸汽的焓为 $h_g = h_{fg} + h_f$, 式中 h_{fg} 和 h_f 可通过前述方法得到. 由(V), 饱和液体的熵为

$$s_f = \int \frac{dq}{T} = \int_{233.15}^T c_f dT/T = c_f \ln(T/233.15)$$

饱和蒸汽的熵为

$$s_g = s_f + (s_g - s_f) = s_f + h_{fg}/T$$

计算范例: $T = 240\text{K}$, $\ln P_{\text{饱和}} = 21.84 - 10.3009 = 11.5391$, 即

$$P_{\text{饱和}} = 102648\text{Pa} = 1.026\text{bar}$$

$$v_f = 1/(625\text{kg}/\text{m}^3) = 0.0016\text{m}^3/\text{kg}, \quad h_f = (4.50)(240 - 233.15) = 31.5\text{kJ}/\text{kg}$$

$$v_g = 0.0016 + \left(\frac{2105.3}{240} - 3.086 \right) \frac{(240 - 32.98)^2}{(2132.5)(100 \times 1.026)} = 1.114\text{m}^3/\text{kg}$$

$$h_g = 31.5 + (2105.3 - 740.6) = 1396.2\text{kJ}/\text{kg}, \quad s_f = 4.50 \ln(240/233.15) = 0.130\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

$$s_{fg} = h_{fg}/T = 1364.7/240 = 5.686\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K} \quad \text{故} \quad s_g = 0.130 + 5.686 = 5.816\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

- 14.66^D** 假定氟里昂 12 具有下列参数(T 以 $^{\circ}\text{R}$, t 以 $^{\circ}\text{F}$ 为单位): (i) 饱和蒸汽压(psia), $\ln P_{\text{饱和}} = 12.73788 - 4394.1/T$. (ii) 蒸发焓(Btu/lb_m) $= 69.0789 - 0.12393t$; (iii) 液体的密度 $= 85.720\text{lb}_m/\text{ft}^3$; (iv) 液体的比热容 $= 0.2160\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{F}$; (v) 在 $T = 419.69^{\circ}\text{R}$ ($t = -40^{\circ}\text{F}$) 饱和液体的熵和焓为零. 对氟里昂 12 制作一张标准饱和温度表, 显示其从 20°F 到 80°F , 间隔为 10°F 的各参数.

解 如表 14-2 所示, 饱和蒸汽压可方便地在(i)中公式作代换 $T = t + 459.69$ 计算得到.

表 14-2

$t/^{\circ}\text{F}$	$P_{\text{饱和}}/\text{psia}$	$v_f/(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	$v_g/(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	$h_f/(\text{Btu}/\text{lb}_m)$	$h_g/(\text{Btu}/\text{lb}_m)$	$s_f/(\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R})$	$s_g/(\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^{\circ}\text{R})$
20	35.71	0.01167	1.109	12.96	79.56	0.0289	0.1677
30	43.15	0.01167	0.924	15.12	80.48	0.0333	0.1668
40	51.64	0.01167	0.775	17.28	81.40	0.0377	0.1660
50	61.35	0.01167	0.654	19.44	82.32	0.0420	0.1654
60	72.43	0.01167	0.544	21.60	83.24	0.0462	0.1648
70	84.97	0.01167	0.475	23.76	84.16	0.0503	0.1643
80	99.09	0.01167	0.408	25.92	85.08	0.0543	0.1639

饱和液体的比体积就是密度的倒数. 利用(v), 饱和液体的焓为 $h_f = c_f [t - (-40)]$.

利用克劳修斯方程式 $(dP_{\text{饱和}})/(dT) = h_{fg}/[T(v_g - v_f)]$, 得: $v_g = v_f + (h_{fg}/T)(dT/dP)$, 式中 h_{fg} 可从(ii)中的关系式得到. $dT/dP_{\text{饱和}}$ 可通过对(i)中公式取微分求得, 为 $T^2/(4394.1P_{\text{饱和}})$. 而最终关系式为

$$v_g = v_f + (69.0789 - 0.12393t)[(t+459.69)/(4394.1P_{\text{饱和}})](778/144)$$

饱和蒸汽的焓为 $h_g = h_{fg} + h_f$, 式中 h_{fg} 和 h_f 可通过前述方法得到. 利用(v), 饱和液体的熵为 $s_f = c_f \ln(T/419.69)$, 故 $s_g = s_f + h_{fg}/T$.

- 14.67** 三氯甲烷(R20)的特性是(T 以K为单位): (i) 饱和蒸汽压, $\ln[P_{\text{饱和}}(\text{bar})] = 10.03986 - [3068.98/(T - 27.62410)]$; (ii) 液体的比体积, $v_f (\text{m}^3/\text{kg}) = (3.30108 \times 10^{-4}) + (1.13429 \times 10^{-6})T$; (iii) 饱和液体的焓, $h_f (\text{kJ}/\text{kg}) = 148.3 + 0.9185T$; (iv) 饱和液体的熵, $s_f (\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}) = 3.267 + 2.70 \times 10^{-3}T$; (v) 临界温度 $= -536.6\text{K}$, 临界压强 $= 54.72\text{bar}$, 摩尔重(mol. wt.) $= 102.93$, 利用上述数据构筑一温度为 $320 \sim 380\text{K}$, 间隔为 20K 的饱和特性表.

解 让我们先求表 14-3 的第一行. 由(i) $P_{\text{饱和}} = 0.6333\text{bar}$. 对(i)取微分 $dP/dT = 3068.98P/(T - 27.62410)^2 = 0.02274\text{bar}/\text{K} = 2.274\text{kPa}/\text{K}$.

表 14-3

T/K	P/bar	$v_f/(\text{m}^3/\text{kg})$	$v_g/(\text{m}^3/\text{kg})$	$h_f (\text{kJ}/\text{kg})$	$h_g (\text{kJ}/\text{kg})$	$s_f/(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})$	$s_g/(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})$	数据来源
320	0.633	0.00069	0.390	442.2	725	4.131	5.015	本文
320	0.620	0.00070	0.358	442.2	697	4.141	4.936	参考文献
340	1.240	0.00072	0.210	460.6	736	4.185	5.067	本文
340	1.221	0.00072	0.190	460.8	708	4.197	4.923	参考文献
360	2.240	0.00074	0.121	479.0	746	4.239	4.981	本文
360	2.255	0.00074	0.107	478.9	719	4.247	4.913	参考文献
380	3.783	0.00076	0.074	479.3	753	4.293	4.967	本文
380	3.830	0.00076	0.065	479.3	730	4.296	4.907	参考文献

由(ii), $v_f = 6.9 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{kg}$.

由于临界温度已知, 饱和蒸汽体积可从 Z -图表估计得. 因此, 在 320K , $T_r = 320/536.6 = 0.596$, 而 $P_r = 0.6333/54.72 = 0.0116$. 检验图表 E1, 可知在 $T_r = 0.596$, $P_r \approx 0.028$. 而在 $P_r = 0.0116$, $T_r < 0.55$, 由此可得三氯甲烷不服从对应态原则(它是弱极性分子), 选择 Z -参数的平均值为 0.954 , 则 $v_g = ZR_c T/MP = (0.954)(0.08314)(320)/(102.93)(0.6333) = 0.390 \text{m}^3/\text{kg}$.

从(iii) $h_f = 442.2 \text{kJ}/\text{kg}$, 则克劳修斯-克拉帕龙方程给出

$$h_{fg} = Tv_{fg} \frac{dP}{dT} = (320)(0.390 - 0.00069)(2.274) = 283 \text{kJ}/\text{kg}$$

所以

$$h_g = h_f + h_{fg} = 725 \text{kJ}/\text{kg}$$

从(iv), $s_f = 4.131 \text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$, 则

$$s_g = s_f + h_{fg}/T = 5.015 \text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$$

- 14.68^D** 你不注意将装有汽油的一加仑桶放在汽车上, 开始时, 一加仑桶内的压强是 1.01325bar , 温度是 16°C ; 一加仑桶内除了汽油外尚有一些空间让汽油能膨胀. 夏日的一天, 你将汽车停在太阳底下, 桶内物质(包括汽油、汽油蒸汽和空气)作用在桶壁上的压强为 3.50bar , 试求此时该桶的温度已升至多少度? [假定汽油具有水的性质, $1\text{U.S. 加仑} = 3.78 \times 10^{-3} \text{m}^3$ (题 1.38 推导), 另外, $\ln[P_{\text{饱和}}(\text{bar})] \approx 13.18771 - 4916.94/[T(\text{K})] \equiv \ln f(T)$, 忽略液体比体积随温度的增长.]

解 在 16°C 水的饱和蒸汽压是 0.01809bar , 故所含空气的分压强(由道尔顿定律)是 $1.01325 - 0.01809 = 0.99516\text{bar}$, 加热后, 空气的分压强按照等容下的理想气体方程增加, $P_{a2} = P_{a1}(T_2/T_1) = (0.99516)(T_2/289.15) = (3.44167 \times 10^{-3})T_2$.

同时,水的饱和蒸汽压为 $P_{\text{饱和}} = f(T_2)$, 因此,求解 T_2 的方程就成为 $3.30 = (3.44167 \times 10^{-5}) T_2 + f(T_2)$, 用试探法求得

T	$(3.44167 \times 10^{-5})T + f(T)$
400K	3.3767 + 2.1482 = 3.8249(太大)
390K	1.3423 + 1.7863 = 3.1286(太小)
395K	1.3612 + 2.0954 = 3.4566(低)
396K	1.3629 + 2.1623 = 3.5252(高)

因此, $T_2 \approx 395 + [(3.5000 - 3.4566) / (3.5252 - 3.4566)](396 - 395) = 395.63\text{K} = 122.5^\circ\text{C}$.

- 14. 69^D** 你不小心将装有汽油的一加仑桶放在汽车上. 开始时, 加仑桶内的压强是 14.6959psia, 温度是 60°F . 加仑桶内留有一部分空间可让汽油膨胀. 夏日的一天, 你将汽车停在烈日下面, 桶内物质(包括汽油、汽油蒸汽和空气)作用 50psia 的压强在桶壁上, 试求此时该桶的温度已升至多少度? [假定汽油具有水的性质, 1U. S. 加仑 = 231 英寸³. 另外, $\ln[P_{\text{饱和}}(\text{psia})] \approx 15.85189 - 8843.7/[T(^{\circ}\text{R})] \equiv \ln f(T)$, 忽略液体比体积随温度的增长.]

解 在 60°C , 水的饱和蒸汽压是 0.2563psia, 故所含空气的分压强(由道尔顿定律)是 $14.6959 - 0.2563 = 14.4396\text{psia}$, 加热后, 空气的分压强按照等容下的理想气体方程给出的关系增加:

$$P_{a2} = P_{a1}(T_2/T_1) = (14.4396)(T_2/519.69) = (0.02779)T_2$$

同时, 水的饱和蒸汽压为 $P_{\text{饱和}} = f(T_2)$. 因此, 求解 T_2 的方程就成为 $50 = 0.02779T_2 + f(T_2)$, 由试探法求得

T	$0.02779T + f(T)$
650°R	18.0635 + 9.4514 = 29.7611(太低)
700°R	19.4530 + 24.9789 = 47.6500(太低)
710°R	19.7309 + 29.8437 = 49.5746(太低)
715°R	19.8699 + 32.5598 = 52.4297(太高)
711°R	19.7587 + 30.3712 = 50.1299(还高)

由内插法得 $T_2 \approx 710 + [(50 - 49.5746) / (50.1299 - 49.5746)](711 - 710) = 710.77^\circ\text{R} = 251.1^\circ\text{F}$.

- 14. 70^D** 对 600K 的蒸汽

$P(\text{bar})$	10	15	20	25	30	40	50	60
$v(\text{m}^3/\text{kg})$	0.271	0.179	0.133	0.105	0.0863	0.0630	0.0490	0.0396

假定第一位力(virial)系数 $A = 2.770\text{bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$, 求第二、第三力系数, 并由此求蒸汽在下列压强下的比体积: (a) 1bar; (b) 80bar; (c) 100bar.

解 若 $Pv = A + BP + CP^2 + DP^3 + \dots$, 则系数可

用下列方程连环求得:

$$\begin{aligned} A &= \lim_{P \rightarrow 0} Pv, & B &= \lim_{P \rightarrow 0} \frac{Pv - A}{P} \\ C &= \lim_{P \rightarrow 0} \frac{Pv - A - BP}{P^2} \end{aligned} \quad (1)$$

式中每一求极限过程都可通过图解外推到零压强完成, 即等效于

$$B = \lim_{P \rightarrow 0} \frac{d(Pv)}{dP}, \quad C = \lim_{P \rightarrow 0} \frac{d}{dP} \left(\frac{Pv - A}{P} \right) \quad (2)$$

由于 A 已知, 作函数 $(Pv - A)/P$ 垂直于 P (图 14-5),

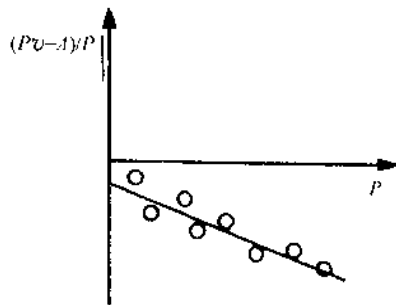


图 14-5

然后,由式(1),竖轴上的截距给出 $B \approx -0.0052 \text{ m}^3/\text{kg}$. 而由式(2),起始段的斜率给出 $C \approx -2.18 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg} \cdot \text{bar}$. 因此, $Pv(600\text{K}) \approx 2.770 - (0.00525)P - (2.18 \times 10^{-7})P^2$.

$$(a) Pv = 2.770 - 0.00525 \times 0.0001 = 2.7647 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg}, \quad v = Pv/P = 2.765/1 = 2.765 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

$$(b) Pv = 2.770 - 0.420 - 0.140 = 2.210 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg}, \quad v = Pv/P = 2.210/80 = 0.0276 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

$$(c) Pv = 2.770 - 0.525 - 0.218 = 2.027 \text{ bar} \cdot \text{m}^3/\text{kg}, \quad v = Pv/P = 2.027/100 = 0.0203 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

14.71^D 1100°F下蒸汽

$P(\text{psia})$	100	200	300	400	500	600	800	900
$v(\text{ft}^3/\text{lb}_m)$	9.2588	4.6132	3.0646	2.2903	1.8256	1.2943	1.1286	0.9994

假定第一位力系数 $A = 929.112 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lb}_m$, 求第二、第三位力系数, 并由此求蒸汽在 1100°F 和下列压强下的比体积; (a) 14.696 psia; (b) 1000 psia.

解 仿照题 14.70 中的图解法, 求得零压强下的截距 $B \approx -0.03225 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$ 和起始段的斜率 $C \approx -7.5 \times 10^{-7} \text{ ft}^3/\text{lb}_m \cdot \text{psia}$, 因此 $Pv(1100^\circ\text{F}) \approx 929.11 - (0.03225)P - (7.5 \times 10^{-7})P^2$.

$$(a) \quad Pv = 929.11 - 0.471 - 0.000 = 928.64 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lb}_m$$

$$v = Pv/P = 928.64/14.696 = 63.19 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

$$(b) \quad Pv = 929.11 - 32.25 - 0.15 = 896.71 \text{ psia} \cdot \text{ft}^3/\text{lb}_m$$

$$v = Pv/P = 896.71/1000 = 0.8967 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

14.72 塞林德(Callendar)的状态方程为

$$v - b = \frac{RT}{P} - \frac{a}{T^n}$$

式中 $n = 10/3$, a , b 和 R 是常数. 解释为什么该方程不能用以临界点.

解 在常温下求状态方程对压强的微分, 得 $dv = -(RT/P^2)dP$, 故

$$(\partial P/\partial v)_T = -P^2/RT$$

则

$$\left(\frac{\partial^2 P}{\partial v^2}\right)_T = \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = -\frac{2P}{RT} \left(\frac{\partial P}{\partial v}\right)_T = \frac{2P^3}{(RT)^2}$$

而在临界点 $(\partial P/\partial v)_T$ 与 $(\partial^2 P/\partial v^2)_T$ 消失(均为零)与上述结果不符, 故在临界点塞林德方程失效.

14.73 指出若气体服从塞林德方程, 且 $a \neq 0$, 则 $c_p = c_p(T, P)$.

解 观察题 4.154, 它充分显示 $(\partial^2 v/\partial T^2)_P \neq 0$, 但是

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = \frac{R}{T} + \frac{na}{T^{n+1}} = (n+1) \frac{R}{P} - \frac{n}{T}(v-b)$$

$$\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_P = \frac{n}{T^2}(v-b) - \frac{n}{T} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P = \frac{n(n+1)}{T^2} \left[(v-b) - \frac{RT}{P} \right] = -\frac{n(n+1)a}{T^{n+2}}$$

14.74 在 Z 图上(图 E3), 是否存在焓随压强增加而减小的区域.

解 变题 4.177 的关系,

$$(\partial h/\partial P)_T = -(RT^2/P)(\partial Z/\partial T)_P$$

因此, 当 P 为常数时, 在此区域, 曲线上 Z 随 T 的变化为正, 这一区域如图 14-6 上的阴影区域所示.

14.75^D (a) 在冰的融点压强增加 1 bar, 将产生什么变化? (b) 对此结果作评论.

解 (a) 利用克劳修斯-克拉帕龙方程和表 A2 的数据,

$$\Delta T = (\Delta P)(T)(v_g - v_f)/(h_g - h_f) = (100 \text{ kPa})(273.15 \text{ K})(0.000091 \text{ m}^3/\text{kg})/(-333.5 \text{ kJ/kg}) = -7.45 \times 10^{-3} \text{ K}$$

(b) 融点温度降低了, 而大多数物质压强增加, 融点上升.

14.76^D 在冰的融点增加 15 psia 的压强, 将产生什么变化?

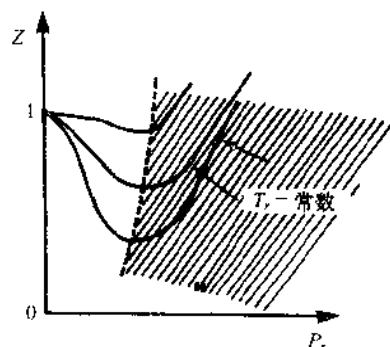


图 14-6

解 利用克劳修斯-克拉帕龙方程和表 A1 的数据,

$$\begin{aligned}\Delta T &= (\Delta P)(T)(v_g - v_f) / (h_g - h_f) \\ &= (15)(144 \text{ lb}_f/\text{ft}^2)(492^\circ\text{R})[(0.01747 - 0.01602) \text{ ft}^3/\text{lb}_m] / [(143.3 - 0)(778) \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m] \\ &= -0.0138^\circ\text{R}\end{aligned}$$

14. 77^D 将 R12 的正常沸点提高 1K 压强需改变多少 bar?

解 利用克劳修斯-克拉帕龙方程和表 C4 的数据,

$$\begin{aligned}\Delta P &= (\Delta T)(h_g - h_f) / T(v_g - v_f) \\ &= (1\text{K})[(538.2 - 372.1) \text{ kJ/kg}] / (243.0\text{K})[(0.160 - 0.001) \text{ m}^3/\text{kg}] \\ &= 4.30 \text{ kN/m}^2 = 0.043 \text{ bar}\end{aligned}$$

14. 78^D 要使水在 220°F 时沸腾, 压强需改变多少?

解 利用克劳修斯-克拉帕龙方程和表 A1 的数据,

$$\begin{aligned}\Delta P &= (\Delta T)(h_g - h_f) / T(v_g - v_f) \\ &= [(220 - 212)^\circ\text{F}][(1151 - 180)(778) \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lb}_m] / (672^\circ\text{R})[(26.8 - 0.02) \text{ ft}^3/\text{lb}_m] \\ &= 336 \text{ lb}_f/\text{ft}^2 = 2.33 \text{ psia}\end{aligned}$$

14. 79 (a) 定义绝热垂直温度梯度; (b) 求取干空气在 SI 制下的绝热垂直温度梯度.

解 (a) 绝热垂直温度梯度指在绝热条件下, 空气温度在竖直方向的变化率.

(b) 若 $T^k P^{1-k}$ 为常数 (参见题 2. 329), 则微分得

$$kT^k P^{1-k} dT + (1-k)T^k P^{-k} dP = 0 \quad \text{或} \quad dT/dP = [(k-1)/k](T/P)$$

另一方面, 对垂直高度变化 z , 有 $dP = -\rho g dz$, 因此,

$$\begin{aligned}\frac{dT}{dz} &= \frac{dT}{dP} \cdot \frac{dP}{dz} = -\frac{g(k-1)}{k} \left(\frac{T}{P} \right) = -\frac{g(k-1)}{kR} \\ &= -\frac{(9.807 \text{ m/s}^2)(0.4)}{(1.4)(287 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K})} = -9.76 \times 10^{-3} \text{ K/m} \approx -10^\circ\text{C/km}\end{aligned}$$

14. 80 在 USCS 制下的绝热垂直温度梯度是多少?

解 $(-9.76 \text{ K/km})(1.8^\circ\text{F/K})(0.3048 \text{ km}/1000 \text{ ft}) = -5.36^\circ\text{F}/1000 \text{ ft}$

14. 81 (a) 什么是状态的三次方程? (b) 利用三次方程概念, 求取范德瓦耳斯气体的临界参数 P_c , v_c 和 T_c .

解 (a) 用 v 表示的三次式, 其系数取决于 P 和 T . 当 $P = P_c$, $T = T_c$, 方程式将有三次根 $v = v_c$, 因此三次式简化成 $(v - v_c)^3 = v^3 - (3v_c)v^2 + (3v_c^2)v - v_c^3 = 0$.

(b) 范德瓦耳斯方程改写成如下形式: $v^3 + (b + RT_c/P_c)v^2 + (a/P_c)v - (ab/P_c) = 0$, 将此和 (a) 中结果相比较, 得 $3v_c = b + RT_c/P_c$, $a/P_c = 3v_c^2$, $ab/P_c = v_c^3$.

由此可解得 P_c , v_c , T_c , 其结果与题 4. 56 解得的一致.

第五章

用增加、降低或保持不变回答题 14. 82~14. 86, 并验证你的回答.

14. 82 有气体流过喷嘴, 沿流动方向温度_____.

解 降低. 因由第一定律 $0 = \Delta H + \Delta KE$, 现 $\Delta KE > 0$, 则 $\Delta H < 0$, 即 $\Delta T < 0$.

14. 83 在汽轮机中, 沿流动方向气体的比体积_____.

解 增加. (即气体膨胀)

14. 84 当理想气体流过一节流装置, 沿流动方向温度_____.

解 保持不变 (参见题 4. 126).

14. 85 在一热交换器中, 纯流体 A 从饱和蒸汽冷凝成饱和液体, 而将热量传给流体 B, 沿流动方向流体 A 的温度_____.

解 保持不变. 对纯流体, 其饱和蒸汽的温度与饱和液体的温度是相同的.

14.86 在题 14.85 中, 流体 A 的焓沿流动方向_____.

解 降低 ($h_f < h_g$).

14.87 判断下列命题是否正确: 水通过容器底部的小孔漏出, 其流速与小孔直径成正比.

解 错误. 根据托里折里 (Torricelli) 定律, 流速等于自由落体的速度.

14.88 气体流过一绝热压缩机, 比较吸进与排出时的温度.

解 在稳定流动方程中 $Q = 0$, $W > 0$, $\Delta KE - \Delta PE \approx 0$

因此 $\Delta H > 0$, 这意味着从吸进到排出温度是升高的.

14.89^D 给出在室温下通过增加压强 ΔP (bar) 使液态水压缩所需功 (kJ/kg) 的粗略估计.

解 $w \approx v_f \Delta P \approx (10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg})(\Delta P \text{ bar})(100 \text{ kPa/bar}) \approx (1/10) \Delta P \text{ (kJ/kg)}$

14.90^D 给出在室温下通过增加压强 ΔP (psia) 使液态水压缩所需功 (Btu/lbm) 的粗略估计.

解 $w \approx v_f \Delta P \approx (0.01604 \text{ ft}^3/\text{lb}_m)(\Delta P \text{ lb}_f/\text{in}^2)(144 \text{ in}^2/\text{ft}^2)/(778 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{Btu})$
 $\approx (0.003) \Delta P \text{ (Btu/lbm)}$

14.91 在题 14.89 和 14.90 的求解中, 怎样确定液体的比体积更适当.

解 蒸汽表的检验表明, 在常温下液体的比体积接近于常数, 故任何近似值都能采用.

第六章

题 14.92~14.94 涉及工作在两相同热源间的热机 A 和热泵 B, 热机 A 输出的功, 驱动热泵 B.

14.92 画出热流图, 假定 A 和 B 是可逆的.

解 参见图 14-7, 在相同温度区间工作的所有热机具有相同的效率. 因此, 热流量是大小相等, 方向相反, 没有净热流流进或流出高低温热源.

14.93 假定 A 是可逆的, B 是不可逆的, 画出热流图.

解 参见图 14-8, 对两种表示做功 W 的方法, 有

$$Q_h - Q_c = Y - X \quad (1)$$

由于 B 是不可逆的, 循环过程的克劳修斯不等式 (题 3.124) 给出

$$0 > \sum Q/T = X/T_h + Y/T_c \quad (2)$$

最后, 由于 A 是卡诺热机,

$$Q_h/T_h = Q_c/T_c \quad (3)$$

由式 (2) 和 (3), $Y/X > T_h/T_c = Q_h/Q_c$ 即 $(Y-X)/X > (Q_h-Q_c)/Q_c$

将此和式 (1) 比较, 得 $X < Q_c$ 和 $Y < Q_h$. 因此将有净热流 $Q_h - Y = Q_c - X$, 从热源传向冷源.

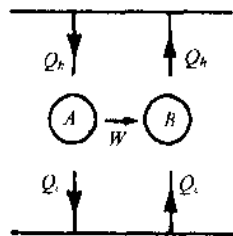


图 14-7

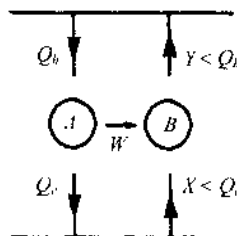


图 14-8

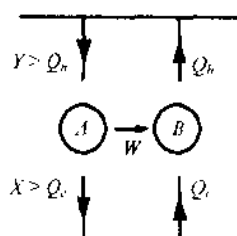


图 14-9

14.94 假定 A 是不可逆的, B 是可逆的, 画出热流图.

解 参见图 14-9, 仿照题 14.93 的分析, 有

$$Y - X = Q_h - Q_c \quad (1)$$

$$0 > Y/T_h - X/T_c \quad (2)$$

$$Q_c/T_c = Q_h/T_h \quad (3)$$

可求得 $X > Q_c$, $Y > Q_h$. 又一次有净热流从高温热源流向低温热源.

- 14.95 一卡诺热机(E),其工作热源的温度为 600K,驱动一个从温度为 150K 的热沉上提取热量的卡诺制冷机(R),两部机器都传递相同的热量 X 至热容量为无穷大的公用蓄热器.故蓄热器的温度保持不变(见图 14-10).计算:(a)公用蓄热器的温度;(b)制冷机的性能系数.

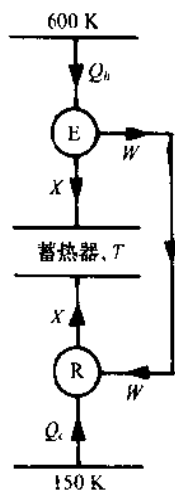


图 14-10

解 设蓄热器的温度为 T ,解下列三个方程:

$$\begin{aligned} Q_h - X &= X - Q_c \\ Q_h/600 &= X/T = Q_c/150 \end{aligned}$$

求得 $T=375\text{K}$.

(b)性能系数 $\text{COP}^* = 150/(375-150) = 2/3$.

- 14.96^D 对题 14.95 的系统,若热机 E 的热力学效率和 R 作为热泵的性能系数(COP^*)的倒数相等时,蓄热器的温度为多少(K)?

解 $\eta^* = 1/\text{COP}^*$ 即 $1-(T/600) = (T-150)/T$

求得 $T=300\text{K}$.

- 14.97^D 当两极限温度为 -200°F 和 750°F 时,重解题 14.96.

解 $1-(T/1210) = (T-260)/T$ 即 $T = 561^\circ\text{R} = 101^\circ\text{F}$

- 14.98^D 各项条件和题 14.96 相同,所不同的是热机 E 的热力学效率与 R 作为制冷机的性能系数相同.求蓄热器的温度.

解 $1-(T/600) = 150/(T-150)$ 解得 $T=240\text{K}$

- 14.99^D 各项条件和题 14.97 相同,所不同的是热机 E 的热力学效率与 R 作为制冷机的性能系数相同.求蓄热器的温度.

解 $1-(T/1210) = 260/(T-260)$ 即 $T = 428^\circ\text{R} = -32^\circ\text{F}$

- 14.100^D 利用一功率为 2kW 的卡诺热泵将一房间加热至 22°C ,当房间内外表面温度差为 1°C 时能量的损失率为 0.5kW,当外表面温度降至多少时热泵仍能正常工作?

解 房间损失的热量来自热泵.故当外界温度为 T_c 时,所需的热量(kW)为 $\dot{Q} = (0.5)(295 - T_c)$,现热泵能提供 $\dot{Q}_h = (\text{COP}^*)\dot{W} = [295/(295 - T_c)](2)$,令 \dot{Q} 与 \dot{Q}_h 相等,解得

$$T_c = 260\text{K} = -13^\circ\text{C}$$

- 14.101^D 除了房间被加热至 72°F ,内外表面温差为 1°F 时能量损失率为 0.25kW 外,其余条件与题 14.100 相同,求热泵能正常工作的外表面最低温度.

解 $\dot{Q} = (0.25)(532 - T_c)$, $\dot{Q}_h = [532/(532 - T_c)](2)$

解得 $T_c = 464.4^\circ\text{R} = 4.4^\circ\text{F}$

- 14.102 一发明者为大规模制造热机寻找财政资助.该热机工作在 500°F 和 40°F 之间,能将 61.35% 的输入能量转换为输出功.能对其投资吗?

解 若热机是可逆的,效率 $\eta^* = 1 - T_c/T_h = 1 - (40+460)/(500+460) = 0.479$,故 47.9% 是最大可能的输出功.

- 14.103 题 14.102 的发明者被火星(Martians)控告为盗用了工作在 40°M 和 500°M 之间的火星热机的计划,这一指责能接受吗?

解 令火星的零点温度为 α ,则 $\eta^* = 1 - (40+\alpha)/(500+\alpha) = 0.6135$,故 $\alpha = 250^\circ(\text{R}')$,将此选为零点,可逆热机将可能有此效率.

- 14.104 在理想气体卡诺循环中是否能使所有的功全部输出?

解 不能,只有在绝对零度时,等温压缩的功(输入功)才为零,而绝对零度是达不到的.

- 14.105 能否可以利用卡诺热机定义一个与具体物质的特性无关的温标?

解 可以.关系式 $T_h/T_c = Q_h/Q_c$ 定义了一个,而且不管其工作介质是什么都有相同的温

标.

第七章

14. 106 为什么奥托(Otto)循环中的最小体积不能为零?

解 因为(i)这将使活塞与汽缸底部发生机械碰撞;(ii)即使理想气体体积也不为零;(iii)无穷大的压缩比意味着循环效率为 100%——违反了热力学第二定律.

14. 107 什么因素限制了奥托循环中体积的上限?

解 (i)更高的压缩比意味着要有更多的稀有燃料;(ii)制造很深的气缸不可能;(iii)更高的温度将导致氮氧化物(NO_x)的形成.

14. 108 判断下列命题是否正确:不等式 $1 < r_c \leq r$ 总适用于狄塞尔(Diesel)循环,式中 r_c = 截止比, r = 压缩比.

解 正确.

14. 109 为什么奥托循环的压缩比不能无限制增长?

解 因为要出现燃烧的预点燃,导致回火.

14. 110 导致布雷顿循环失效的主要原因是什么?

解 在压缩机和膨胀透平机中的机械失效(例如摩擦).

14. 111 多项选择:加里弗尼亚比其他州更需要内燃机,因为(i)氮氧化物使太平洋酸性太强不利于鱼的生长;(ii)在柏班克市(Burbank)(和其他地区)烟雾太多;(iii)信号山(Signal Hill)本地就生产汽油;(iv)要让民众使用旧金山出产的小汽车;(v)他们的汽油税比较低.

解 (ii)正确,也许(iv)也是一个原因.

14. 112 布雷顿循环的再热仅包含气体,而改进的兰金(Rankine)循环则在给水加热器中包含了液态水和蒸汽,两者有何相同之处?

解 都使循环输入的能量减少.

14. 113^D 题 7. 120 中的理想气体的布雷顿循环,工作在 1bar, 300K 和 5bar, 1000K 之间,采用无损耗的透平压缩机和透平膨胀机,得到的热力学效率为 36.87%. (a)为了让循环的热力学效率增长为 40%,空气需被压缩到多少 bar? (b)结果有多少净功(kJ/kg)输出?

解 (a)令 $\eta = 1 - r_p^{(1-k)/k} = 0.40$, 解得 $r_p \approx 5.977$. 因此吸进 1bar 的空气,需要将其压缩至 5.977 ≈ 6bar.

(b)对相同的最高循环温度 1000K,

$$q_h = c_p T_1 (T_3/T_2 - r_p^{(1-k)/k}) = (1.005)(300)(1000/300 - 6^{2/7}) = 501.9 \text{ kJ/kg}$$

14. 114^D 题 7. 121 中的理想空气的布雷顿循环,采用无损耗的透平压缩机和透平膨胀机,工作在 15psia, 60°F 和 1000psia, 1500°F 之间,取得的热力学效率为 41.83%, (a)为了让循环的热力学效率为 40%,空气需被压缩到多少 psia? (b)结果有多少净功(Btu/lb_m)输出?

解 (a)令 $\eta = 1 - r_p^{(1-k)/k} = 0.40$, 解得 $r_p \approx 6$, 因此 $P_2 = r_p P_1 = 6(15) = 90 \text{ psia}$.

(b)对相同的最高循环温度 1500°F = 1960°R

$$q_h = c_p T_1 (T_3/T_2 - r_p^{(1-k)/k}) = (0.240)(520)(1960/520 - 6^{2/7}) = 262.2 \text{ Btu/lb}_m$$

14. 115 一利用空气作为工作介质的内燃发动机有六个气缸,每一个气缸的工作容积为 0.400L,压缩比是 8.5 : 1,该热机假定工作于奥托循环或等容循环.忽略机械损失,计算输出功(kW).假定曲轴转速是 550 转/分,燃料的热值是 42MJ/kg,空气/燃料的质量比是 16 : 1,容积效率为 75%.

解 输出功率(\dot{W})是输入功率(\dot{Q})与热力学效率(η)的乘积。由已给数据, $\eta = 1 - r^{1-\gamma} = 1 - 8.5^{-0.4} = 0.574$ 。容积效率定义为通过热机的空气的实际体积(折合为标准状态)除以气缸的工作容积。因此对容积效率为 75% 的六缸内燃机, 通过的空气体积为 $V = 6 \times 0.400 \times 0.75 = 1.8\text{L}$ (标准状态), 应用标准状态下的理想气体定律, 求得通过的空气质量

$$m = PV/RT = (101.3\text{kPa})(1.8 \times 10^{-3}\text{m}^3) / (0.2870\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(273.15\text{K}) = 2.326 \times 10^{-4}\text{kg}$$

因此, 燃料的质量是 $(1/16)(2.326 \times 10^{-4}) = 1.454 \times 10^{-5}\text{kg}$, 每个循环输入的能量为

$$\dot{Q} = (1.454 \times 10^{-5}\text{kg})(42\text{MJ/kg}) = 6.106\text{kJ/循环}$$

假定是一个四程循环, 每个循环两转, 则有 $(5500/60)/2 = 45.83$ 循环/秒, 因此, 输入的功率为 $\dot{Q} = (6.106\text{kJ/循环})(45.83\text{循环/秒}) = 279.8\text{kW}$, 最后求得 $\dot{W} = (0.574)(279.8) = 160.6\text{kW}$ 。

- 14.116^D** 有这样一个题目“火花塞金属在 1500K 开始熔蚀是热机设计的一个极限。当吸入空气参数为 1bar, 300K, 释放的热是 650kJ/kg, 压缩比必须小于多少才不超过这一极限”。(a)一些学生将释放的热量解释为燃烧燃料释放的能量;(b)另一些学生则解释为排放的热量。学生们将会得到两个什么样的不同结果?

解 利用火花塞的即为奥托循环, 采用图 7-16 的符号。

(a)若 $q_h = 650\text{kJ/kg}$, 则 $(0.7176)(1500 - T_2) = 650$, 求得 $T_2 = 594.2\text{K}$, 则 $r^{0.4} = T_2/T_1 = 594.2/300 = 1.981$, 因此 $r = 5.521$ 。

(b)由 $\eta = 1 - q_c/q_h = 1 - 1/r^{0.4}$, 因此 $r^{0.4} = q_h/q_c$, 由假设 $q_c = 650\text{kJ/kg}$, 即

$$q_h = (0.7176)(1500 - T_2) = (0.7176)(1500 - 300r^{0.4}) = (215.3)(5 - r^{0.4})$$

因此 $r^{0.4} = (215.3/650)(5 - r^{0.4})$, 即 $r^{0.4} = 1.244$, 所以 $r = 1.726$ 。

- 14.117^D** 题 14.116 中两个结果的平均有效压强差为多少 bar?

解 平均有效压强 $\text{mep} = w_{\text{net}}/\Delta v$, 式中 $\Delta v = v_1 - v_2 = [(r-1)/r]v_1$ 为最大容积变量, $w_{\text{net}} = \eta q_h = (1 - 1/r^{0.4})q_h$ 为每一循环的输出功率。

(a)若 $q_h = 650\text{kJ/kg}$ 和 $r = 5.521$, 则

$$\eta = 1 - (1/5.521^{0.4}) = 0.495, \quad w_{\text{net}} = (0.495)(650) = 322\text{kJ/kg}$$

因 $v_1 = 0.8610\text{m}^3/\text{kg}$ (由题 2.310 或理想气体方程), $\Delta v = 0.7051\text{m}^3/\text{kg}$, 因此

$$\text{mep} = 322/0.7051 = 457\text{kJ/m}^3 = 4.57\text{bar}$$

(b)若 $q_h = (1.244)(650) = 809\text{kJ/kg}$, $r = 1.726$, 则 $\eta = 1 - (1/1.726^{0.4}) = 0.196$, $w_{\text{net}} = (0.196)(809) = 159\text{kJ/kg}$, 因 $\Delta v = 0.3622\text{m}^3/\text{kg}$, 因此

$$\text{mep} = 159/0.3622 = 439\text{kJ/m}^3 = 4.39\text{bar (压强差为 } 0.18\text{bar)}$$

- 14.118^D** 当吸入空气参数为 15psia, 540°R, 释放的热是 300Btu/lb_m, 当空气的最高温度不超过 2700°R 时, 奥托循环中的压缩比为多少?

解 和题 14.116 一样处理。(a)若 $q_h = 300\text{Btu/lb}_m$, 则 $(0.1714)(2700 - T_2) = 300$, 即 $T_2 = 950^\circ\text{R}$, 而 $r^{0.4} = T_2/T_1 = 950/540 = 1.759$, 因此 $r = 4.105$ 。

(b)若 $q_h = r^{0.4} q_c = r^{0.4} (300\text{Btu/lb}_m)$, 又有 $q_h = c_v(T_3 - T_2) = (0.1714\text{Btu/lb}_m \cdot ^\circ\text{R})(2700 - 540r^{0.4})$, 由此得 $r^{0.4} = 1.178$, 即 $r = 1.507$ 。

- 14.119^D** 题 14.118 中的两个循环的平均有效压强差是多少 psia? (利用题 14.117 的公式)

解 (a)若 $q_h = 300\text{Btu/lb}_m$, $r = 4.105$, 则 $\eta = 1 - (1/4.105^{0.4}) = 0.432$, $w_{\text{net}} = (0.432)(300) = 129\text{Btu/lb}_m$, 由 $v_1 = RT_1/P_1 = (53.35)(540)/(15 \times 144) = 13.33\text{ft}^3/\text{lb}_m$, $\Delta v = (r-1)v_1/r = 10.08\text{ft}^3/\text{lb}_m$, 故 $\text{mep} = (129\text{Btu/lb}_m)/(10.08\text{ft}^3/\text{lb}_m) = 12.8\text{Btu/ft}^3 = 69.2\text{psia}$ 。

(b)若 $q_h = (1.178)(300) = 353\text{Btu/lb}_m$, $r = 1.507$, 则

$$\eta = 1 - (1/1.507^{0.4}) = 0.151, \quad w_{\text{net}} = (0.151)(353) = 53.4\text{Btu/lb}_m$$

因 $\Delta v = 4.48\text{ft}^3/\text{lb}_m$, 则

$$\text{mep} = 53.4/4.48 = 11.92\text{Btu/ft}^3 = 64.4\text{psia (压强差为 } 4.8\text{psia)}$$

- 14.120** 区别(单汽缸)热机的指示功率和实在功率。

解 指示功率为热机发出的功率, 它由取自汽缸的示功图确定。实在功率是由热机转化得到且被实际利用的功率。机械效率就是实在功率除以指示功率。

14. 121 一实验室使用的单缸汽车发动机, 输出功率(实在功率)为 2kW, 发动机的机械效率在 400 转/分时为 85%, 平均有效压强是 7.5bar, 假定行程为汽缸直径的二倍, 计算汽缸的直径(mm).

解 奥托循环的周期 τ 取作时间单元, 由题 14. 115, $\tau = 2(60/400) = 0.3\text{s}$, 由题 14. 120, 热机作的功为指示功率(i. p.) = 实在功率(b. p.) / 机械效率 = $2/0.85 = 2.35\text{kW}$, 因此, 对一个周期, $W_{\text{net}} = (2.35\text{kW})(0.3\text{s}) = 0.705\text{kJ}$, 另一方面, 在一周期内, 活塞扫过的体积为 $\Delta V = \text{面积} \times \text{行程} = (\pi d^2/4)(2d) = \pi d^3/2$, 式中 d 为汽缸直径, 则

$$m_{\text{ep}} = 750\text{kPa} = (0.705\text{kJ}) / (\pi d^3/2)$$

解得

$$d = 0.084\text{m} = 84\text{mm}$$

14. 122 奥托循环的进口压强为 P_1 , 经一多变指数为 r_c 的压缩过程, 压强为 P_2 , 在循环中达到的最高压强为 P_3 , 再经一多变指数为 r_e 的膨胀过程, 压强为 P_4 , 假定压缩比为 r , 证明平均有效压强为

$$\bar{P} = \frac{1}{r-1} \left(\frac{P_3 - rP_4}{r_c - 1} - \frac{P_2 - rP_1}{r_c - 1} \right)$$

解 多变过程非流动功的表达式为 $W = (P_f V_f - P_i V_i) / (n-1)$, 在奥托循环中, 有两个相互作用功: 压缩功 W_{12} , $n = r_c$, 膨胀功 W_{34} , $n = r_e$. 因此, 净输出功为

$$W_{\text{net}} = -(W_{12} + W_{34}) = - \left(\frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{r_c - 1} + \frac{P_4 V_4 - P_3 V_3}{r_e - 1} \right) \\ = - \frac{P_3 V_3 - P_4 V_4}{r_e - 1} - \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{r_c - 1}$$

而 $V_3 = V_2 = V_1/r = V_4/r$, 所以

$$W_{\text{net}} = \left(\frac{P_3 - P_4 r}{r_e - 1} - \frac{P_2 - P_1 r}{r_c - 1} \right) V_2$$

用 $\Delta V = V_1 - V_2 = (r-1)V_2$ 除上式, 平均有效压强 \bar{P} 就可求得.

14. 123^D 六缸汽车每一汽缸的孔径为 4in, 行程为 8in, 在 15psia 下吸入空气, 压缩比为 5.5:1, 压缩过程符合规律: $PV^{1.35} = \text{常数}$, 而膨胀过程符合规律: $PV^{1.30} = \text{常数}$, 经过燃烧过程, 汽缸中的压强为原来的三倍. 每 1 秒点火 10 次. 计算: (a) 平均有效压强(psia); (b) 指示功率(hp).

解 在图 7-16 中,

$$P_1 = 15\text{psia}, \quad P_2 = (v_1/v_2)^{r_c} P_1 = (5.5^{1.35})(15) = 162\text{psia}$$

$$P_3 = 3P_2 = 486\text{psia}, \quad P_4 = P_3(v_3/v_4)^{r_e} = (1/5.5^{1.30}) = 44.7\text{psia}$$

$$(a) \text{ 由题 14. 122, } \bar{P} = [(P_3 - rP_4)/(r_e - 1) - (P_2 - rP_1)/(r_c - 1)] / (r - 1) \\ = \{ [486 - (5.5)(44.7)] / (1.30 - 1) - [162 - (5.5)(15)] / (1.35 - 1) \} / (5.5 - 1) = 127\text{psia}$$

$$(b) \text{ 对每一次点火, } W_{\text{net}} = \bar{P} \Delta V = (127)(\pi 4^2/4)(8) = 12760\text{in} \cdot \text{lb}_f = 1064\text{ft} \cdot \text{lb}_f$$

因此, 对六缸汽车, 指示功率

$$\text{i. p.} = 6(1064\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{次点火})(10\text{次点火/秒}) / (550\text{ft} \cdot \text{lb}_f/\text{秒 hp}) = 116\text{hp}$$

14. 124^D 一作奥托循环的单缸发动机, 孔径为 100mm, 行程为 200mm, 在 1bar 下吸入空气, 经压缩后体积为初始时的 20%, 若压缩和膨胀的多变指数分别为 1.35 和 1.30. 燃烧后温度升高 350%, 计算: (a) 平均有效压强(bar); (b) 每秒一次点火的指示功率(kW).

解 在图 7-16 中, $P_1 = 1\text{bar}$, $P_2 = P_1(v_1/v_2)^{r_c} = 1(5^{1.35}) = 8.78\text{bar}$

$$P_3/P_2 = T_3/T_2 = 3.5$$

因此,

$$P_3 = (3.5)(8.78) = 30.74\text{bar}, \quad P_4 = P_3(v_3/v_4)^{r_e} = 30.74/5^{1.30} = 3.79\text{bar}$$

(a) 由题 14. 122,

$$\bar{P} = \{ [30.74 - 5(3.79)] / (1.30 - 1) - [8.78 - 5(1)] / (1.35 - 1) \} / (5 - 1) = 7.13\text{bar}$$

$$(b) \quad W_{\text{net}} = \bar{P} \Delta V = (7.13 \text{ kPa})(0.2 \text{ m})[\pi(0.1)^2/4\pi^2] = 1.12 \text{ kJ/次点火}$$

$$\text{指示功率} \quad i.p. = (1.12 \text{ kJ/次点火})(1 \text{ 次点火/秒}) = 1.12 \text{ kW}$$

14. 125 英国出版物称“低速”和“高速”狄塞尔循环, 解释这一术语。

解 在第七章介绍的简单狄塞尔循环中, 假定燃料在最高压强的瞬间被吸入, 并在此压强下完全被燃烧。这些假定在低速下有理由成立, 即转速上限为 200~250 转/分, 压强上限为 25~40 bar。然而, 在高速下, 燃料加热的时间不能忽略, 燃料必须在压强达到最大值前被吸入。所以, 实际过程近似于一等压过程后面紧接一个瞬间的能量释放(即等容过程)——这就是所谓的双循环分析。

14. 126 热机的重要设计参数是:(a) 功率/重量比(对汽车发动机); (b) 投资与运行费用的平衡。对奥托循环讨论这些问题。

解 (a) 对奥托循环, 可通过增加压缩比增加功率(即 W_{net}), 但这需要一个更长更宽的汽缸, 这样就增加了热机的重量。因此, 可得到一临界点, 在此功率/重量比最大。
(b) 增加热机的尺寸将增加投资费用, 这能否被增加的效率抵消而得到更便宜的输出净功?

14. 127 对狄塞尔和双重循环重新讨论题 14. 126 的问题。

解 所考虑的问题与奥托循环完全相同。

14. 128 对布雷顿和气体透平循环重新讨论题 14. 126 的问题。

解 (a) 由于在开口的透平中空气的压缩有限制, 故在增加压缩比方面不能做更多的工作。为增强运行安全设备变大了, 因而热机也更重了。
(b) 为抵消重量的增加, 热机可以用超级合金, 这将增加投资费用。在高压下运行的设备经受更强的应力导致了长时期的保养。在许多情况下, 一个粗糙的、效率不高的热机仅需很少保养就能维持很长时间, 大大减少的运行费用在经济核算方面甚至远远超过输出功的减少。

14. 129 解释用于汽油割草机等处的二冲程循环, 它与奥托循环有何不同之处?

解 如图 14-11 所示, 随着活塞向下运动, 在上部的燃尽气体通过排气口排出, 而下部的混合气体被活塞压缩。当活塞到达其行程的下部区域时, 传递旁路的顶部被打开, 使在底部的高压混合物升至顶部。照理说, 传至顶部的混合物会通过排气口逸出。实际上只有一小部分逸出。这是因为(1)膨胀降低了它的压强;(2)活塞的形状使气流转向, 流至汽缸的内部顶端;(3)当混合气体上升时, 活塞完成其下降行程转而上行, 将混合气体截留在汽缸的顶部。

在汽缸顶部的进一步压缩, 加热了混合气体, 并用火花将其点燃。所产生的高压气体驱动活塞向下运动并做功, 最后开启排气导管。当活塞运动至顶部时, 在其下部造成部分真空, 适当的混合气体通过引入口吸入。

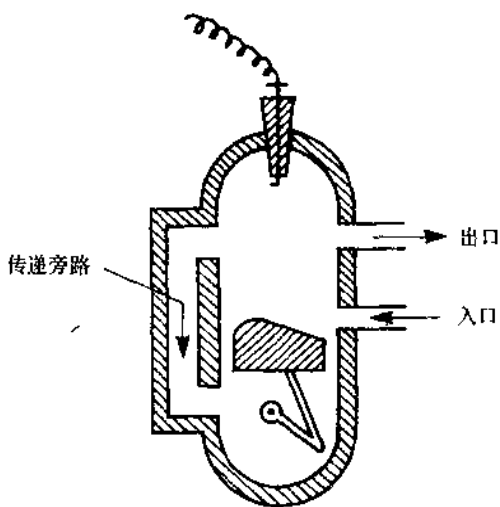


图 14-11

14. 130 在一航空透平循环中, 压缩机在 1 bar, 300 K 下压缩空气, 其效率为 80%, 经过等熵压缩, 温度升至 475.2 K。驱动压缩机的膨胀透平机的进气温度为 1000 K, 它的排气温度是多少(K)?

解 此题的求解是基于这样一个事实, 膨胀透平机的全部输出功用于驱动压缩机。使用符号 1 = 压缩机进口, 2 = 压缩机出口, 3 = 膨胀机进口, 4 = 膨胀机出口。对一完全有效压缩 $w_c = c_p(T_2 - T_1) = (1.005)(475.2 - 300) = 176.1 \text{ kJ/kg}$, 驱动它实际所需作功 $w_a = w_c/\eta_c = 176.1/0.8 = 220.1 \text{ kJ/kg}$ 。

将此和膨胀机的实际输出功相等, 得

$$c_p(T_3 - T_{4a}) = (1.005)(1000 - T_{4a}) \quad \text{解得} \quad T_{4a} = 781\text{K}$$

- 14.131^D 一专利提出下列循环, 10bar, 1000K 的空气在等容下被加热, 使其体积加倍, 然后在等容下冷却至 1bar, 300K. 其后, 经过 P - v 图上一直线路径让空气返回其初始条件. (a) 在 P - v 图上画出此循环; (b) 每一循环的净输出功是多少(kJ/kg)? (c) 其热力学效率是多少(%)? (d) 是否能授予其专利?

解 (a) 见图 14-12.

$$\begin{aligned} (b) \quad w_{\text{net}} &= (P\text{-}v \text{ 图上三角形的面积}) = (1/2)(v_2 - v_1)(P_2 - P_3) \\ &= (1/2)v_1(P_2 - P_3) = (1/2)(RT_1/P_1)(P_2 - P_3) \\ &= (1/2)[(0.287)(1000)/10](10 - 1) = 129.2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

[注意压强单位已消去]

$$(c) \quad q_h = c_p(T_2 - T_1) = (1.005)(2000 - 1000) = 1005 \text{ kJ/kg}$$

[因 $P_2 = P_1$, $v_2/v_1 = T_2/T_1 = 2$,] 则 $\eta = w_{\text{net}}/q_h = 129.2/1005 = 12.9\%$.

(d) 不能. 因 $T_3 = T_2(P_3/P_2) = 2000(1/10) = 200\text{K}$, 不是 300K!

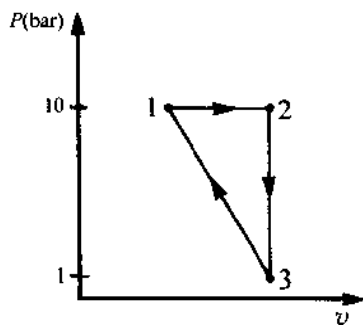


图 14-12

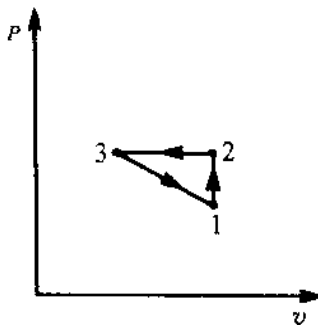


图 14-13

- 14.132^D 另一专利申请提出, 100psia, 500°F 下空气在等容下加热直至其温度(华氏温度)加倍. 然后在等压下将其冷却回 500°F, 其后, 空气经过 P - v 图上的一直线路径返回初始条件. (a) 在 P - v 图上画出此循环; (b) 每一循环的净输出功是多少(Btu/lbm)? (c) 热力学效率是多少(%)? (d) 能否授予其专利?

解 (a) 见图 14-13.

$$(b) \quad w_{\text{net}} = (P\text{-}v \text{ 图上三角形的面积}) = (1/2)(v_2 - v_3)(P_2 - P_1)$$

对等容加热, 利用理想气体方程:

$$P_2 = P_1(T_2/T_1) = 100(1000 + 460)/(500 + 460) = 152.1 \text{ psia}$$

因此 $P_2 - P_1 = 152.1 - 100 = 52.1 \text{ psia}$, 在等压下冷却,

$$v_3 = v_2(T_3/T_2) = v_2(500 + 460)/(1000 + 460) = 0.6575 \quad v_2 = 0.6575 v_1$$

$$w_{\text{net}} = (1/2)(1 - 0.6575)v_1(P_2 - P_1) = (0.1713)(RT_1/P_1)(P_2 - P_1)$$

$$= (0.1713)[(0.06856)(690)/100](52.1) = 5.87 \text{ Btu/lbm}$$

$$(c) \quad q_h = c_v(T_3 - T_2) = (0.1715 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{R})[(1000 - 500)^\circ\text{F}] = 85.75 \text{ Btu/lbm}$$

则

$$\eta = w_{\text{net}}/q_h = 5.87/85.75 = 6.9\%$$

(d) 没有任何实质性的理由认为此循环不能工作, 然而, η 这样小, 真怀疑发明者用此专利能干什么.

- 14.133 为什么在高压缩比的汽车发动机用汽油中, 需加添加剂?

解 为避免压缩机摩擦产生的热在火花塞之前先点燃汽油. 由于此时曲轴还没有转到点燃的正确位置, 过早地点燃将使发动机发生严重变形.

- 14.134 对于每次给定压缩比和输入热量的循环, 是否奥托循环比狄塞尔循环更有效?

解 是的. 可以通过题 7.51 和题 7.75 所得的 η 表达式作比较.

- 14.135 一测验题称, 如果奥托循环和狄塞尔循环工作在相同的极限压强和温度之间, 则奥托循环比狄塞尔循环的热效率更高. 请对此作评论.

解 参见图 14-14, 在狄塞尔循环 1345 中最高压强和温度出现在点 4, 因此与奥托循环 1245 有着相同的压强和温度极限。

十分明显, 狄塞尔循环的面积更大: $Q_{4D} - Q_{3D} > Q_{4O} - Q_{3O}$, 而 $Q_{D1} = Q_{O1} = |Q_{21}|$, 因此, $Q_{4D} > Q_{4O}$, 所以,

$$\eta_D = 1 - \frac{Q_{3D}}{Q_{4D}} > 1 - \frac{Q_{3O}}{Q_{4O}} = 1 - \frac{Q_{2O}}{Q_{4O}} = \eta_O$$

可见, 该测验题不正确。

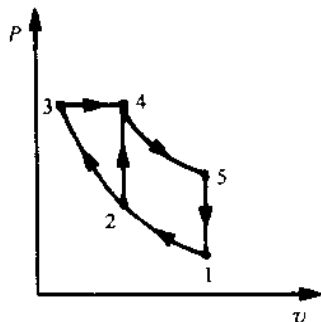


图 14-14

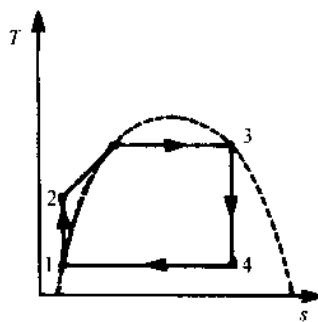


图 14-15

第八章

14. 136^D 热力学工程师现将他的注意点转向兰金循环, 利用公式 $\eta = w_{\text{net}}/q_h$ 和图 14-15 的流程, 热力学工程师称 $q_h = h_3 - h_1$, 即他忽略了泵作的功. 他还说, w_{net} 由下式给出:

$$w_{\text{net}} = \frac{n P_3 v_3}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_3} \right)^{(n-1)/n} \right]$$

式中 $n=1.135$, 假定点 3 位于饱和曲线上, $P_2 = P_3 = 10\text{bar}$, $P_1 = P_4 = 1\text{bar}$, 则他求解: (a) w_{net} 是多少? (kJ/kg); (b) η 是多少(%)?

解 (a) $w_{\text{net}} = \frac{(1.135)(1000\text{kPa})(0.194\text{m}^3/\text{kg})}{1.135-1} \left[1 - \left(\frac{1}{10} \right)^{0.135/1.135} \right] = 391\text{kJ/kg}$

(b) $q_h = 2777 - 418 = 2359\text{kJ/kg}$, $\eta = w_{\text{net}}/q_h = 391/2359 = 16.6\%$

14. 137^D 利用表中数据验证题 14. 136 的结果.

解 $s_3 = s_4 = (\text{在 } 10\text{bar 时的 } s_g) = 6.584 = (1-x_4)(1.303) + x_4(7.360)$

由此得 $x_4 = 0.8719$, 而 $h_4 = 53.5 + 2332.3 = 2386\text{kJ/kg}$, 因此

$$w_c = h_3 - h_4 = 2777 - 2386 = 391\text{kJ/kg}$$

$$w_c = v_f \Delta p \approx (10^{-3}\text{m}^3/\text{kg})(900\text{kPa}) \approx 1\text{kJ/kg}$$

$$w_{\text{net}} = w_c - w_e = 390\text{kJ/kg}, \quad q_h = 2358\text{kJ/kg}, \quad \eta = 16.5\%$$

14. 138^D 热力学工程师称, 如果题 14. 136 中的点 3 位于过热区, 即 $T'_3 > T_3$, w_{net} 还可用相同公式计算, 只是 $n=1.30$. 对 $T'_3=750\text{K}$ ($P'_3 = P_3 = 10\text{bar}$) 重解题 14. 136.

解 (a) $w_{\text{net}} = \frac{(1.30)(1000)(0.343)}{1.30-1} \left[1 - \left(\frac{1}{10} \right)^{(1.30/1.30)} \right] = 613\text{kJ/kg}$

(b) $q_h = 3428 - 418 = 3010\text{kJ/kg}$, $\eta = w_{\text{net}}/q_h = 613/3010 = 20.4\%$

14. 139^D 利用表中数据验证题 14. 138 的结果.

解 $s'_3 = 7.697\text{kJ/kg} > (\text{在 } 1\text{bar 时的 } s_g)$, 故 $T'_4 \approx 441.4\text{K}$, 在此 $h'_4 \approx 2813\text{kJ/kg}$, 则

$$w_c = h'_3 - h'_4 = 3428 - 2813 = 615\text{kJ/kg}$$

$$q_h = h'_3 - h_2 = 3428 - 419 = 3009\text{kJ/kg}, \quad \eta = 615/3009 = 20.4\%$$

这里忽略了泵做的功 ($\approx 1\text{kJ/kg}$).

14. 140^D 应用题 14. 136 的公式, 对工作在 15psia 和 200psia 之间的兰金循环求: (a) w_{net} (Btu/lbm); (b) η (%).

解 (a) $w_{\text{net}} = \frac{(1.135)(200 \times 144)(2.288)}{1.135-1} \left[1 - \left(\frac{15}{200} \right)^{0.135/1.135} \right]$

$$= 146810 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{lb}_m = 188.7 \text{ Btu} / \text{lb}_m$$

$$(b) \quad q_h = 1199 - 181 = 1018 \text{ Btu} / \text{lb}_m, \quad \eta = 188.7 / 1018 = 18.5\%$$

14.141^D 利用表中数据验证题 4.140 的结果.

$$\text{解 } s_3 = s_4 = (\text{在 } 200 \text{ psia 的 } s_g) = 1.5459 \text{ Btu} / \text{lb}_m \cdot ^\circ \text{R} = (1 - x_1)(0.313) + x_1(1.756)$$

故 $x_1 = 0.854, h_4 = 26.4 + 983.0 = 1009 \text{ Btu} / \text{lb}_m$, 则

$$w_c = h_3 - h_4 = 1199 - 1009 = 190 \text{ Btu} / \text{lb}_m$$

$$w_c = \bar{v}_f \Delta P = (0.0167)(200 - 15)(144 / 778) = 0.6 \text{ Btu} / \text{lb}_m$$

$$w_{\text{net}} = 189 \text{ Btu} / \text{lb}_m, \quad q_h = 1017 \text{ Btu} / \text{lb}_m, \quad \eta = 18.6\%$$

14.142^D 假定点 3 现位于过热区, 为 200 psia 和 900°F, 重解题 14.140.

$$\text{解 } (a) \quad w_{\text{net}} = \frac{(1.30)(200 \times 144)(4.002)}{1.30 - 1} \left[1 - \left(\frac{15}{200} \right)^{0.30/1.30} \right]$$

$$= 224800 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f / \text{lb}_m = 289 \text{ Btu} / \text{lb}_m$$

$$(b) \quad q_h = h'_3 - h_2 = 1477 - 181 = 1296 \text{ Btu} / \text{lb}_m, \quad \eta = w_{\text{net}} / q_h = 289 / 1296 = 22.3\%$$

14.143^D 利用表中数据验证题 14.42 的结果.

$$\text{解 } s'_3 = 1.806 \text{ Btu} / \text{lb}_m > (\text{在 } 15 \text{ psia 的 } s_g), \text{ 故 } T'_3 \approx 285^\circ \text{F}, \text{ 此时 } h'_3 = 1191 \text{ Btu} / \text{lb}_m, \text{ 则}$$

$$w_c = 1477 - 1191 = 286 \text{ Btu} / \text{lb}_m, \quad q_h = h'_3 - h_2 = 1477 - 181 = 1296 \text{ Btu} / \text{lb}_m$$

$$\eta = 286 / 1296 = 22.0\%$$

这里泵做的少量功 ($\approx 1 \text{ Btu} / \text{lb}_m$) 已考虑.

14.144 在何种循环中, 不可逆绝热膨胀通常比可逆的更有用?

解 在兰金循环中, 适度的不可逆降低了透平出口处的湿度 (这对保护汽轮机有益).

14.145 增强兰金循环热力学效率的最好方法之一是什么? 为什么?

解 过热. 可使汽轮机叶片保持干燥.

14.146 一超临界蒸汽动力厂具有中间再热装置. 蒸汽在 300 bar, 900 K 下进入汽轮机, 最后膨胀至 1 bar. 蒸汽在 30 bar 下离开第一级, 一部分进入一封闭加热器, 剩下的则被再加热至 800 K. 汽轮机两部分的绝热效率均为 88%. 在主冷凝器和主加热器的冷凝液出口之间有一冷凝泵, 另一给冷凝的抽出蒸汽加压的泵, 安装在锅炉和主加热器的冷凝液出口之间. 试确定图 14-16 状态点 10 的焓和抽出至加热器的蒸汽流量的份额.

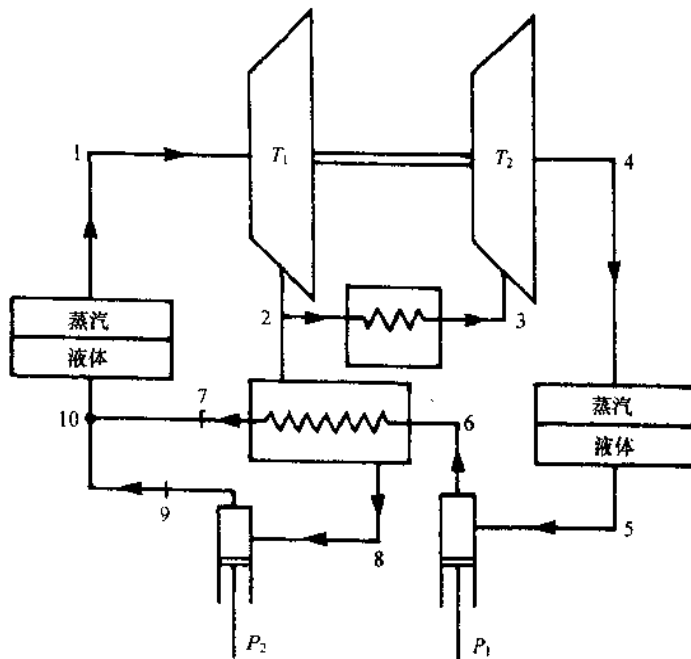


图 14-16

解 在点 1, 表 A5 给出 $s_1 = 6.327 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, $h_1 = 3562 \text{ kJ/kg}$. 在 30bar, $s_g = 6.185 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此, 对等熵膨胀, 状态 2 是过热的. 通过内插, 在 507K, $s = s_g = 6.185 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 在 550K, $s = 6.432 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 因此,

$$T_{2s} = 506.8 + [(6.327 - 6.185)/(6.432 - 6.185)](550 - 506.8) = 531.8 \text{ K}$$

相应地, $h_{2s} = 2803 + (24.8/43.2)130 = 2878 \text{ kJ/kg}$. 所以,

$$w_{2s} = h_1 - h_{2s} = 3526 - 2878 = 648 \text{ kJ/kg}, \quad w_{2s} = \eta_p w_{2s} = (0.88)(648) = 570 \text{ kJ/kg}$$

因此 $h_{2a} = h_1 - w_{2s} = 3526 - 570 = 2956 \text{ kJ/kg}$, 这将在大约 559K 时出现, 此时

$$s_{2a} = 6.472 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

由表 A4, 在 30bar 和 800K, $s_3 = 7.447 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 在 1bar, $s_g = 7.360 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. 因此, 经等熵膨胀后的状态 4 是过热的, 内插得 $T_{4s} \approx 389.2 \text{ K}$, 此时, $h_{4s} \approx 2709 \text{ kJ/kg}$. 所以,

$$w_{4s} = h_3 - h_{4s} = 3629 - 2709 = 920 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{4s} = \eta_p w_{4s} = (0.88)(920) = 810 \text{ kJ/kg}$$

因此, $h_{4a} = h_3 - w_{4s} = 3629 - 810 = 2819 \text{ kJ/kg}$, 这将在大约 445K 时出现. 此时

$$s_{4a} = 7.714 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

接下来,

$$h_5 = (\text{在 1bar 时的 } h_f) = 417.5 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{56} = \bar{v}_f \Delta P = (1.043 \times 10^{-3})(30000 - 100) = 31.2 \text{ kJ/kg}$$

因此,

$$h_6 = h_5 + w_{56} = 417.5 + 31.2 = 448.7 \text{ kJ/kg}$$

同样 h_8 (在 30bar 时的 h_f) = 1008.4 kJ/kg,

$$w_{89} = \bar{v}_f \Delta P = (1.216 \times 10^{-3})(30000 - 3000) = 32.8 \text{ kJ/kg}$$

因此

$$h_9 = h_8 + w_{89} = 1008.4 + 32.8 = 1041.2 \text{ kJ/kg}$$

令 \dot{m}_2 为流过泵 2 的质量, 也是从点 2 流过点 8 和 9 的质量, 令 \dot{m}_1 为流过泵 1 的质量, 也是从点 2 流过点 3, 4, 5, 6, 7 的质量, 两股流体在锅炉内汇合. 由点 6-7 之间加热器的能量平衡得

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_1 h_6 = \dot{m}_2 h_8 + \dot{m}_1 h_7 \quad \text{即 } \dot{m}_1/\dot{m}_2 = (h_2 - h_8)/(h_7 - h_6)$$

代入上面求得的各焓值, 而 h_7 则利用 300bar 和 $T_{2s} = 559 \text{ K}$ 时的估计值, 求得 $\dot{m}_1/\dot{m}_2 = 2.389$, 即 $\dot{m}_2/(\dot{m}_1 + \dot{m}_2) = 0.295$ 抽出至加热器的份额.

剩下的问题是计算 h_{10} , 由点 7, 9, 10 的能量平衡, 得 $\dot{m}_1 h_7 + \dot{m}_2 h_9 = (\dot{m}_1 + \dot{m}_2) h_{10}$. 因此 $2.389 h_7 + h_9 = 3.389 h_{10}$, 即

$$h_{10} = 888.9 + 307.2 = 1196 \text{ kJ/kg}$$

14.147 计算题 4.146 的热效率.

解

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{(m_1 + m_2)w_{12} + m_1 w_{34} - m_1 w_{56} - m_2 w_{89}}{(m_1 + m_2)(h_1 - h_{10}) + m_1(h_3 - h_2)} \\ &= \frac{(m_1/m_2 + 1)w_{12} + (m_1/m_2)w_{34} - (m_1/m_2)w_{56} - w_{89}}{(m_1/m_2 + 1)(h_1 - h_{10}) + (m_1/m_2)(h_3 - h_2)} \\ &= \frac{(3.389)(570) + (2.389)(810) - (2.389)(31.2) - 32.8}{(3.389)(3526 - 1196) + (2.389)(3629 - 2956)} = 0.396 \end{aligned}$$

14.148 “在兰金循环中降低排汽压强可减少汽轮机叶片的腐蚀”, 这话对吗?

解 一般的回答是“不对”. ——降低排汽压强意味着增加排汽湿度(图 14-17 点 2s), 但若汽轮机明显降低效率, 可得出排汽会更干一些的结论(图 14-17 点 2a).

14.149 兰金循环有时被称为“蒸汽卡诺循环”是否因为两个循环的工作次序完全一致?

解 不是. 本身工作一样, 而次序不同.

14.150 对下列说法作评论: 只有兰金循环所选择的排汽条件能使汽轮机叶片所处的空气湿度小百分之十.

解 此说法不对. 大多数实际循环都满足要求.

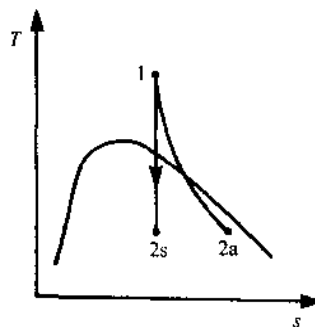


图 14-17

题 14.151~14.156 有关图 14-18~14-21 表示的循环,工质是水,各图尺寸相同。

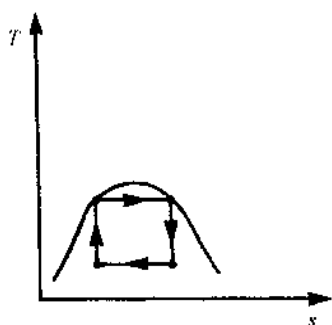


图 14-18

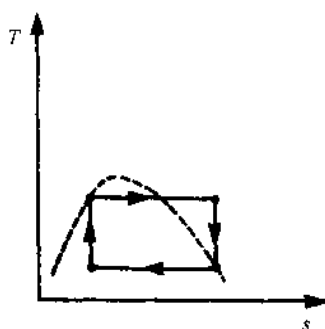


图 14-19

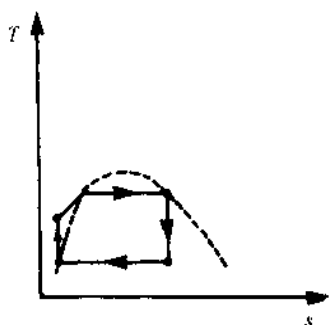


图 14-20

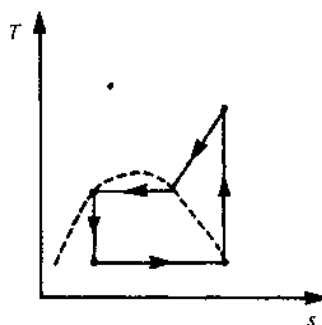


图 14-21

14.151 哪些是热机循环?

解 图 14-18, 图 14-19, 图 14-20.

14.152 哪些是热泵循环?

解 图 14-21.

14.153 具有相同热力学效率的循环存在吗?

解 存在. 图 14-18 和图 14-19 的卡诺循环.

14.154 图中是否有兰金循环? 若有, 哪些是?

解 图 14-20 所示是兰金循环.

14.155 图中是否有制冷循环? 若有, 哪些是?

解 图 14-21 所示是制冷循环.

14.156 哪种循环的冷凝过程具有最大的传热?

解 在图 14-18~14-20 的循环中, 图 14-19 中低温冷却阶段的熵变 Δs 最大, 因此, $\Delta q = T\Delta s$ 大于图 14-18 和图 14-20. 然而, 图 14-21 的循环中, 冷凝阶段出现在高温区, 若图 14-21 的 Δs 和图 14-19 的一样(题中已指出, 各图尺寸相同.) 则由于图 14-21 具有更高的平均温度, 故最大的传热出现在此循环中.

第九章

14.157 两种临界饱和的空气-蒸汽混合物又被混合在一起. 混合物的最后状态是: (i) 仍饱和; (ii) 不饱和; (iii) 完全冷凝; (iv) 部分冷凝; (v) 说不清.

解 (iv) 正确.

14.158 湿空气混合物的露点温度会超过湿球温度吗?

解 不会.

14.159 下列说法哪个正确. 空气-水蒸气混合物的相对湿度: (i) 指示混合物中水蒸气的质

量;(ii)是水蒸气的分压强和空气分压强的比值;(iii)等于混合物中水蒸气在混合物温度下的摩尔分数;(iv)是在混合物温度下水蒸气的分压强与饱和压强的比值。

解 答 (iv)正确。

- 14.160 下列说法哪个正确:空气-水蒸气混合物在饱和状态具有:(i)湿球温度等于露点温度;(ii)湿度比为 1;(iii)空气的分压强等于水蒸气的分压强;(iv)空气的分压强精确等于一个大气压。

解 答 (i) 正确。

- 14.161 下列说法是否正确:对空气,湿球温度近似等于绝热饱和温度。

解 答 正确。

第十章

- 14.162 在林德-哈普森(Linde-Hampson)循环中主要经济损失是什么?

解 答 是漏热。

- 14.163 (a)给出一张简单的示图,由此可推断甲烷系列任何制冷剂的公式;(b)说明怎样构筑 100-和 200-系列制冷剂的相似图。

解 答 (a)见图 14-22;

(b)对 100-系列,将等边三角形的每条边六等分,在 C_2H_6 顶点标上 170, C_2Cl_6 为 110, C_2F_6 为 116。对 200-系列,将每条边八等分,在 C_3H_8 顶点标上 290, C_3Cl_8 为 210, C_3F_8 为 218。

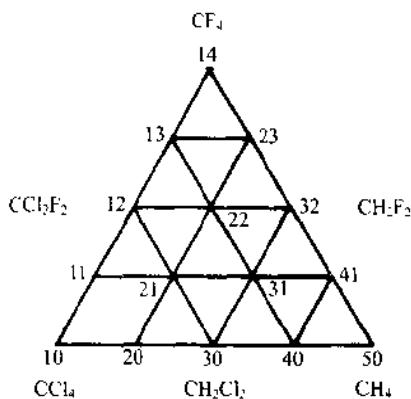


图 14-22

- 14.164 在菲利普热机(斯特林(Stirling)循环)上市以前需大力发展哪种热力学装置?

解 答 再生装置。

- 14.165 理想节流过程是无传热产生的过程(参见题 5.41)。实际上,传热还是发生了。为什么节流过程还要采用?

解 答 有总比没有好(Half a loaf is better than none)。

- 14.166 制冷剂应廉价,为何氮、氩、氦这些普通物质没有采用?

解 答 这些物质极低的临界温度使它们不能被冷凝(对家庭制冷循环而言)。

- 14.167 判断下列命题是否正确:贵重的制冷剂是哪些具有高蒸发焓的。

解 答 正确。

- 14.168 液体的蒸发是否降低了温度?

解 答 如果纯物质的话,蒸发不降低液体本身的温度,而是液体蒸发所需的能量对周围环境产生了冷却效应。

- 14.169 定义制冷量的 U. S. 吨。

解 答 溶化 32°F 冰的潜热大约为 144 Btu/lb_m, 故溶解 1 U. S. 吨的冰所需能量为 (2000 lb_m) (144 Btu/lb_m) = 288000 Btu。

制冷量的标准商业吨取作冷却功率为

$$288000 \text{ Btu/天} = 12000 \text{ Btu/小时} = 200 \text{ Btu/分}$$

- 14.170 将制冷量的 U. S. 吨转换为马力。

解 答 $(12000 \text{ Btu/小时}) [(1 \text{ hp}) / (2545 \text{ Btu/小时})] = 4.72 \text{ hp}$

- 14.171 很明显,制冷剂应廉价、无毒、化学性质不活泼,其次是制冷剂应无味。为什么你认为下列各项也是制冷剂的重要性质?(a)高的蒸发焓(即潜热);(b)相当高的临界

温度; (c) 饱和蒸汽比体积小.

解 因为: (a) 只有少量的制冷剂具有给定的冷却效果.

(b) 整个循环在大气压以上完成, 可减少泄漏的发生.

(c) 小的体积可使用小的压缩机, 这可减小投资和运行费用.

- 14.172 一按常规方法工作的 R12 制冷循环, 工作在 1bar 和 10bar 之间, 其性能系数(COP)为 2.15, 压缩机的等熵效率(%)是多少?

解 $\text{COP} = q_c / w_{\text{net}}$, 对按常规运行的 R12 制冷机, 仅有一次做功——在压缩机中. 因此, $\text{COP} = q_c / w_{12s}$.

在状态点 1, $h_1 = 538.2 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 4.576 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 因

$$q_c = h_1 - h_4 = h_1 - h_3 = 538.2 - 440.8 = 97.4 \text{ kJ/kg}$$

求得

$$w_{12s} = q_c / \text{COP} = 97.4 / 2.15 = 45.3 \text{ kJ/kg}$$

现对绝热压缩, $s_{2s} = s_1 = 4.576$, 求得

$$T_{2s} = 320 + [(4.576 - 4.557) / (4.580 - 4.557)](10) = 328.3 \text{ K}$$

$$h_{2s} = 572.8 + (8.3/10)(580.3 - 572.8) = 579.0 \text{ kJ/kg}$$

则 $w_{12s} = h_{2s} - h_1 = 40.8 \text{ kJ/kg}$

$$\eta_{\text{压缩}} = w_{12s} / w_{12a} = 40.8 / 45.3 = 90\%$$

- 14.173 题 14.172 中的 COP, 与卡诺 COP* 比较, 达到的百分数是多少?

解 $\text{COP}^* = T_c / (T_{2s} - T_c) = 243 / (328.3 - 243.0) = 2.85$

$$\text{COP} / \text{COP}^* = 2.15 / 2.85 = 75\%$$

- 14.174 按常规运行的林德-哈普森循环, 在 1bar, 300K 下吸入空气, 压缩至 100bar, 然后依次经过一个换热器和节流阀, 膨胀至 1bar, 若整个装置是绝热的, 产率是 4.8%. 现不用节流阀, 改用等熵膨胀机使空气膨胀至 1bar, 则产率增加多少? 若需要, 可利用下列有关空气的数据.

T/K	100	120	140	160	180	200
在 100bar						
$v/(\text{m}^3/\text{kg})$	0.00125	0.00142	0.00174	0.00252	0.00366	0.00467
$h/(\text{kJ/kg})$	-79.4	-41.3	3.9	61.7	111.8	148.8
$s/(\text{kJ/kg} \cdot \text{K})$	3.376	3.721	4.076	4.457	4.753	4.949

$$\text{在 1bar 下的饱和状态} \begin{cases} v_f = 0.001140, & v_g = 0.309 \\ h_f = -124.9, & h_g = 76.8 \\ s_f = 2.974, & s_g = 5.549 \end{cases}$$

解 对节流过程, $h_3 = h_4 = (1 - x_4)h_6 + x_4 h_5 = (1 - x_4)(-127.4) + x_4(79.1)$

而 $y = 4.8\%$ (已给出), 故在 $P_3 = P_2 = 100\text{bar}$,

$$1 - y = x_4 = 0.952, \quad h_3 = (0.048)(-127.4) + (0.952)(79.1) = 69.2 \text{ kJ/kg}$$

在 100bar, $h_3 = 69.2 \text{ kJ/kg}$, 内插得

$$T_3 = 160 + (7.5/50.1)(20) = 163.0 \text{ K}$$

在此温度下, $s_3 = 4.501 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, 绝热膨胀至 4' 点, 由 $s'_4 = s_3 = (1 - x'_4)(2.974) + x'_4(5.549)$, 求得

$$x'_4 = 0.5930, \quad \text{所以} \quad y'_4 = 1 - x'_4 = 0.4071 \approx 41\%$$

- 14.175 (a) 在题 10.40 中, 15psia, 80°F 的空气在林德-哈普森循环中被压缩至 1500psia, 产率是多少(液态空气的百分数)? (b) 可能达到的最大产率是多少(%)?

解 (a) 利用题 10.40 和题 10.42 的数据以及题 10.41 的公式, 产率为 $1 - (h_2/h_1) = 1 - (120.1/129.1) = 0.0697 \approx 7\%$.

(b) 在 h_2 最小时获得最大产率. 查阅 80°F 下的焓值(表 14-4)可知这将在 7000psia 左右时获得, 此时, $y = 1 - (h_2/h_1) = 1 - (109.7/129.1) = 0.1503 \approx 15\%$.

表 14-4

P/psia	$h/(\text{Btu/lb}_m)$	P/psia	$h/(\text{Btu/lb}_m)$	P/psia	$h/(\text{Btu/lb}_m)$
0	129.2	1600	119.6	3200	113.3
200	127.9	1800	118.6	3400	112.8
400	126.6	2000	117.7	3600	112.3
600	125.3	2200	116.8	3800	111.8
800	124	2400	116.0	4000	111.5
1000	122.9	2600	115.3	5000	110.0
1200	121.7	2800	114.6	6000	109.5
1400	120.6	3000	113.9	7000	109.7
				8000	110.3

14.176 为什么说,争取题 14.175 的最大产率是不经济的?

解 要获得 7000psia 这么高的压强,将需要昂贵的设备和很高的运行费用.

14.177 性能系数(COP)为 5.0 的蒸汽-压缩制冷机产生 1 吨冷量(参见题 14.169),所需的功率是多少?

解 若 COP 是 1,则由题 14.170,将需 4.72hp 的功率,现对 $\text{COP}=5$,则需 $4.72/5=0.95\text{hp}$ 的功率.

第十一章

14.178 化学反应的温度能否超过绝热火焰温度?

解 不能.因为 $Q=0$,就没有热量加入可使反应温度升高.

14.179 在奥赛特分析中,什么物质没有考虑?

解 水.

14.180 1kg 丁烷(C_4H_{10})和 17kg 空气发生燃烧反应,基于体积分数的空气/燃料比是多少?

解 $(\text{空气/燃料})_{\text{体积}} = (\text{空气/燃料})_{\text{质量}} \times (\text{燃料摩尔重/空气摩尔重}) = (17/1)(58/29) = 34/1$.

14.181 在题 14.180 的燃烧中,产生了多少一氧化碳($\text{kgCO}/\text{kg C}_4\text{H}_{10}$)?

解 每 1kg 丁烷,有碳 $(4 \times 12)/58 = 0.828\text{kg}$ 和氢 $(10 \times 1)/58 = 0.172\text{kg}$,按表 G1,0.828kg 碳需要 $(0.828)(11.5) = 9.52\text{kg}$ 空气,而 0.172kg 氢气需要 $(0.172)(34.5) = 5.93\text{kg}$ 空气,故总共需要 15.45kg 空气.由于所提供的空气(17kg)超出了当量燃烧的需要量(15.45kg),可假定燃烧反应是完全的,故无 CO 形成.

14.182 什么是 JANAF 表?

解 大写字母是空军、海军联合部队(Joint Army, Navy and Air Force)首字母的缩写,全称应为 JANAF 热化学表.

这些表已由国家标准局(National Bureau of Standards)出版.虽然忽略了一些高分子的碳氢化合物,但它们还是公众能获得的范围最广泛的热化学表.

第十二章

14.183 判断下列命题是否正确:在化学反应中,吉布斯函数总是趋于极小值.

解 正确.条件是反应在等温、等压下进行.

14.184 化学反应的程度是:(i)反应物分解的程度;(ii)产物分解的程度;(iii)仅取决于所产生水的状态.

解 (i)正确.

14. 185 判断下列命题是否正确:水汽混合物的吉布斯函数与混合物的干度无关.

解 正确.

14. 186 多项选择:若平衡常数增加,则(i)反应温度降低;(ii)反应率降低;(iii)反应温度增加;(iv)反应率增加.

解 (iii)正确.

第十三章

14. 187^D 具有 5 个自由度的一理想气体的 $R=0.287\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. (a) 计算等容下的比热容 ($\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$); (b) 它的分子质量是多少 (kg/kmol); (c) 该气体可能是什么?

解 (a) 假定每个自由度对单位质量内能贡献的平均值是 $(1/2)RT$, 则

$$c_v = (\partial u / \partial T)_v = 5R/2 = 2.5(0.287) = 0.7175\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$(b) \quad M = R_u/R = (8.314\text{ kJ/kmol}\cdot\text{K})/(0.287\text{ kJ/kg}\cdot\text{K}) = 28.97\text{ kg/kmol}$$

(c) 空气.

14. 188^D 具有 8 个自由度的一理想气体的 $R=0.117\text{Btu/(lb}_m\cdot^\circ\text{R)}$. (a) 计算等压下的比热容 $\text{Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{R}$; (b) 它的分子质量是多少 ($\text{lb}_m/\text{lb}_m\text{mole}$); (c) 该气体可能是什么?

解 (a) 假定每个自由度对单位质量内能贡献的平均值是 $(1/2)RT$, 则

$$c_v = (\partial u / \partial T)_v = 8R/2 = 0.486\text{Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{R}$$

而

$$c_p = c_v + R = 0.644\text{ Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{R}$$

$$(b) \quad M = R_u/R = (1.985\text{ Btu/lb}_m\text{mole}\cdot^\circ\text{R})/(0.117\text{ Btu/lb}_m\cdot^\circ\text{R}) = 16.97\text{ lb}_m/\text{lb}_m\text{mole}$$

(c) 分子质量大约为 17 的最大有可能的气体是氨.

14. 189 在什么温度下, 空气的黏度将是室温下的两倍?

解 “室温”不是十分确定的, 将其取为 $72^\circ\text{F} = 532^\circ\text{R}$, 由 $\mu = aT^{3/4}$, 得 $2 = (T_2/532)^{3/4}$, 解得

$$T_2 = 1340^\circ\text{R} = 880^\circ\text{F}$$

其他杂题

14. 190 用热力学定律表示, 在均一温度 (T) 下, 一封闭物 (“黑体”) 发射或吸收的热辐射的能量密度 (E) 为 σT^4 . 式中 σ 是一通用常数 (史蒂芬-玻尔兹曼常数).

解 假定在完全反射表面散射辐射的正压力为 $E/3$, [与动能理论的结果相比较: $P = (2/3)(U/V)$], 如果流进一封闭物的能量 (“热” $= dQ$) 使封闭物的能量密度、体积和温度产生变化 dE , dV 和 dT , 则第一定律给出 $dQ = dU - dW = dU + PdV = d(EV) + (E/3)dV - VdE + (4/3)EdV$, 若 $S = f(E, V)$, 则 $dS = (\partial S/\partial E)dE + (\partial S/\partial V)dV$, 而对可逆过程, $dS = dQ/T = (V/T)dE + (4E/3T)dV$, 比较 dE 和 dV 的系数, 可得

$$\partial S/\partial V = 4E/3T \text{ 和 } \partial S/\partial E = V/T$$

而将 $\partial^2 S/\partial V\partial E$ 和 $\partial^2 S/\partial E\partial V$ 相等可得

$$\frac{\partial}{\partial V}\left(\frac{V}{T}\right) = \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial E}\left(\frac{E}{T}\right)$$

现由于 T 与 V 无关, 仅是 E 的函数, 因此, $(1/T) = (4/3)[(1/T) - (E/T^2)(dT/dE)]$, 即 $(dE/E) = 4(dT/T)$, 将此积分就能得到所求结果.

14. 191 (a) 什么是太阳常数, 在 SI 制和 USCS 制下它的数值为多少? (b) 用什么方法可试验太阳的热.

解 (a) 通过地球大气层外围的平均太阳能通量的数值为 $1.37\text{kW/m}^2 = 435.5\text{Btu/hr}\cdot\text{ft}^2$.

由于大气层的吸收, 在地球表面的有效数值约为它的一半.

(b) 直接将太阳光聚焦到蒸汽锅炉或光电池上——后者靠吸收的能量产生电势.

14. 192 (a) 介绍涡旋管; (b) 什么情况下使用该装置?

解 (a) 4 到 8 个大气压的空气, 通过一小直径管子进入一个大直径管子, 流向大直径管一

个方向的流体分额受一中间有孔的盘的控制(参见图 14-23),发现流过中孔盘的空气被冷却了,而流向另一侧的流体则被加热了。

(b)对于无需高的热力学效率的快速、中等程度的冷却可采用此装置。

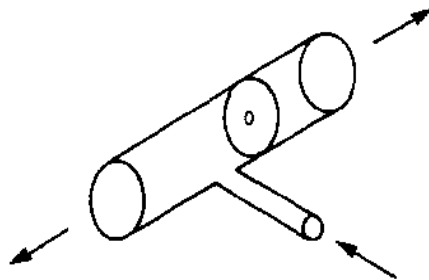


图 14-23

- 14.193 布雷顿循环可按热机运行,也能可逆地按热泵与制冷机运行.这样的变化是否也适用于林德-哈布森循环,能将它转变成按热机运行吗?

解 不能.节流过程是不可逆的,而且漏进的热也不能被可逆地传出。

- 14.194 假定空气的构成成分如表 14-5 所示.计算 c_p : (a)以 $\text{Btu}/\text{lb}_m \text{mole} \cdot ^\circ\text{R}$ 为单位; (b)以 $\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$ 为单位.并显示(a)、(b)结果的一致性。

表 14-5

元素	Mole 质量 M_i	Mole 分数 x_i	质量分数 μ_i	$c_{p,i}$, $(\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})$	$c_{v,i}$, $(\text{Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R})$
氮(N_2)	28.013	0.7803	0.755	0.248	0.177
氧(O_2)	31.999	0.2099	0.232	0.219	0.157
氩(Ar)	39.948	0.0098	0.013	0.125	0.076
		1.0000	1.000		

解 (a) $c_p(\text{空气}) = \sum x_i c_{p,i} M_i = (0.7803)(0.248)(28.013) + (0.2099)(0.219)(31.999) + (0.0098)(0.125)(39.948)$
 $= 6.941 \text{ Btu}/\text{lb}_m \text{mole} \cdot ^\circ\text{R}$

(b) $c_p(\text{空气}) = \sum \mu_i c_{p,i} = (0.755)(0.248) + (0.232)(0.219) + (0.013)(0.125)$
 $= 0.240 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$

(c) $(6.941 \text{ Btu}/\text{lb}_m \text{mole} \cdot ^\circ\text{R}) / (28.966 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{mole}) = 0.24 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$

- 14.195 利用题 14.194 数据求 $c_v(\text{空气})$ 。

解 (a) $c_v = (0.7803)(0.177)(28.013) + (0.2099)(0.157)(31.999) + (0.0098)(0.125)(39.948) = 4.973 \text{ Btu}/\text{lb}_m \text{mole} \cdot ^\circ\text{R}$

(b) $c_v = (0.755)(0.177) + (0.232)(0.157) + (0.013)(0.076) = 0.171 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$

(c) $(4.973 \text{ Btu}/\text{lb}_m \text{mole} \cdot ^\circ\text{R}) / (28.97 \text{ lb}_m/\text{lb}_m \text{mole}) = 0.1717 \text{ Btu}/\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{R}$

- 14.196 为什么公路上的小冰粒即使温度从不高于 0°F 也已消失?

解 小冰粒通过升华消失,即它们直接蒸发成气体.不需要温度达到熔点。

- 14.197 在题 13.17 和 13.30 中给出了气体的导数系数和黏度与温度的简单关系式. (a)应用这些关系式有无限制? (b)在实用中这些关系式的准确性如何?

解 (a)指数关系式 $\psi = aT^b$, 式中 ψ 是气体的特性,而 a 和 b 是常数,严格讲仅适用于氦和氢等稀薄的单原子气体。

(b)即使对十分复杂的分子,简单的指数律仍能得到中等程度的准确性.然而,常数 a, b 的物理意义却不能得到。

14.198 (a)解释“麦克斯韦妖”;(b)为什么“麦克斯韦妖”不违反热力学第二定律?

解 (a)假设有一被隔板分成两部分的刚性容器,隔板上有靠“妖”开启或关闭的小门.最初在门两边的气体具有单一的压强和温度,“妖”能操纵门以使在门的一边为快速运动的粒子和在另一边为缓慢运动的粒子.将动能和温度相等,则建立了一个双温度系统,它可以被用以热机,即获得了可用能而此前却没有.

(b)“妖”作为系统的一部分,必须能区分“慢速”和“快速”运动的粒子以便正确操纵这小门.可见需要一个信息的最小“位”来衡量粒子的速度,这些“位”的积累相当于“妖”的熵的变化,也就是系统的熵的变化.

14.199 S. G. Brush 认为:“可以得出结论,从气体性质推断原子间作用力的整个程序是错误的……”.你同意吗?

解 “程序”来自求解 n 个物体的系统,这里的 n 是 10^{23} 数量级(阿佛加德罗数),而现在三体问题(在万有引力作用下)实际上尚未解决,故应同意 Brush 的观点.

14.200 参考题 14.199,现代计算机能求解这些问题吗?

解 虽然高速计算机已能求解在一盒子内的 500 个粒子的行为,但求解 500 个粒子只是万里长征第一步.被称为“叠加近似”的研究——三个粒子之间的相互作用被近似成三个两两作用的粒子的行为——还几乎没有开始.而对非平衡性质的有效计算,则更不用说了.

14.201 解释吸收式制冷机的原理.

解 参见图 14-24,气态氨在 A 进入冷凝器被液化,液体流过 B 点进入一蒸发器,在蒸发器内与从 D 来的氢流体混合后流出至 C 点.液体蒸发所需要的能量在此过程产生冷却效应.

在 G 点的稀氨水溶液和从 C 点来的流体在 R_1 内混合后生成浓溶液.在 E 点的浓溶液经过加热器 H 产生气泡,气泡离开液体通过泵管 F 进入锅炉 K,氨蒸汽在 A 点流出锅炉,而稀溶液从 G 点排出.

从 D 到 C 的流程相当于蒸汽制冷循环中的低压蒸发阶段;而 E 到 F 和 G 的流程相当于高压冷凝.被冷却的物质放在 R_2 周围.

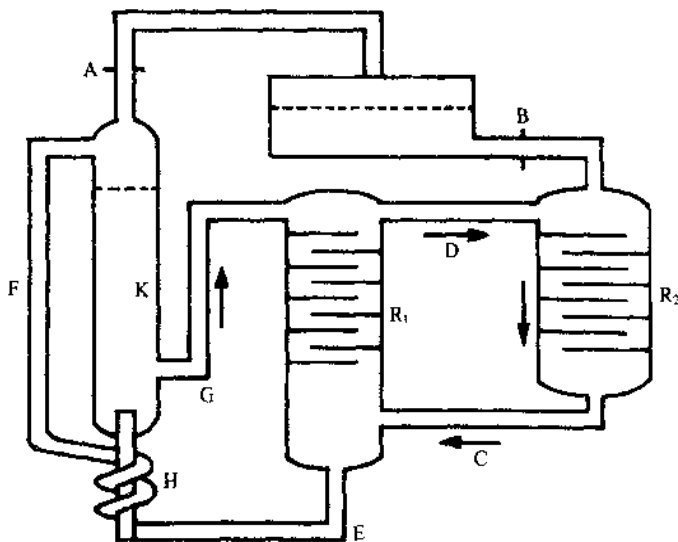


图 14-24

14.202 解释绝热去磁.

解 在一定的温度范围内,经典的制冷方法不能采用.下列现象提供了一种非经典技术.磁粉颗粒可作为基本磁铁.初始时取向杂乱.然后,将沿着所加磁场方向排列,粒子旋转,放出热量.现若将磁场去除,热扰动将破坏原有结构,所需能量只能来自磁粉的冷却——这就是所需的冷却效应.

14. 203 什么是热力学第三定律?

解 一种定义是:不可能经过有限的步骤达到绝对的零度.

14. 204 (a)给出动力设备“火花点火(SI)”和“压缩点火(CI)”的例子;(b)列出家用小汽车采用纯酒精或酒精-汽油混合物的有利条件和不利条件.

解 (a)汽车采用的奥托循环是“火花点火(SI)”循环(虽然热力学分析中不需要火花),而狄塞尔循环是“压缩点火(CI)”循环.

(b)多种酒精或汽油-酒精混合物已在赛车上应用多年.这些燃料能经受非常高的压缩而不被预点燃(“爆击”).然而,这些混合物加快发动机的腐蚀.电锈蚀效应也会出现.而且溶解水的痕迹也是有害的.考虑到这些问题,一些汽车制造商都避免肯定是否他们的小汽车采用了酒精混合物.

14. 205 (a)介绍一种空气分离过程.该过程不像林德-哈普森循环有大量漏热和高压缩功等经济损失;(b)(a)过程将会出现哪些缺点?

解 (a)一种技术是利用半透膜.一般由单层的单一聚合物或多层的不同聚合物构成.最好这些膜是多孔的.可将混合物中的一些成分分离,而不分离其他的.许多最新的研究已能生产具有足够化学稳定性而且高度中孔的膜.中空纤维也已开始研究.

(b)缺点包括缓慢的分离速率和不完全的分离度.因此,林德-哈普森循环仍在高纯度的分离物生产中大量应用.

附录 A 水的性质

表 A1	饱和水性质随温度的变化 · USCS 制
表 A2	饱和水性质随温度的变化——SI 制
表 A3	饱和水的性质随压强的变化 SI 制
表 A4	饱和水及压缩水的比体积、比焓、比熵与压强和温度的关系——USCS 制
表 A5	压缩和过热蒸汽的比体积、比焓、比熵与压强和温度的关系——SI 制

表 A1

温度 /°F	体积 /(ft ³ /lb _m)		焓 /(Btu/lb _m · °R)		内能 /(Btu/lb _m)		比热 /(Btu/lb _m · °R)	
	凝聚态 [†] <i>v_f</i>	蒸汽 <i>v_g</i>	凝聚态 [†] <i>h_f</i>	蒸汽 <i>h_g</i>	凝聚态 [†] <i>u_f</i>	蒸汽 <i>u_g</i>	凝聚态 [†] <i>(c_p)_f</i>	蒸汽 <i>(c_p)_g</i>
0	0.0185	14770	-158.9	1061	-0.325	2.330	-158.9	1011
10	0.0309	9040	-154.2	1066	-0.314	2.283	-154.2	1014
20	0.0505	5655	-149.3	1070	-0.304	2.238	-149.3	1017
30	0.0808	3605	-144.4	1075	-0.294	2.195	-144.4	1021
32	0.0887	3302	-143.3	1076	-0.292	2.187	-143.3	1021
32	0.0887	3302	0.0	1076	0.000	2.187	0.0	1021
40	0.1216	2446	8.0	1079	0.016	2.159	8.0	1024
50	0.1780	1705	18.1	1083	0.036	2.126	18.1	1027
60	0.2562	1207	28.1	1088	0.056	2.094	28.1	1030
80	0.5071	633	48.1	1096	0.094	2.036	48.0	1037
100	0.9497	330	68.0	1105	0.130	1.982	68.0	1043
120	1.694	203	88.0	1114	0.165	1.934	88.0	1050
140	2.891	123	108.0	1122	0.199	1.890	108.0	1056
160	4.743	77.2	128.0	1130	0.231	1.849	128.0	1062
180	7.513	50.2	148.0	1138	0.263	1.811	148.0	1068
200	11.53	33.6	168.1	1146	0.294	1.776	168.0	1074
212	14.70	26.8	180.2	1151	0.312	1.757	180.1	1078
250	29.82	13.8	218.6	1164	0.368	1.700	218.5	1088
300	67.00	6.47	269.7	1180	0.437	1.635	269.5	1100
350	134.6	3.34	321.8	1193	0.503	1.579	321.4	1110
400	247.2	1.87	375.1	1202	0.567	1.527	374.8	1116
450	422.1	1.10	430.2	1206	0.628	1.481	428.6	1120
500	680.5	0.675	487.8	1202	0.689	1.433	485.0	1117
550	1044	0.425	549.3	1191	0.750	1.385	543.1	1109
600	1542	0.268	616.9	1167	0.813	1.333	610.1	1091
680	2206	0.162	696.1	1121	0.883	1.265	685.2	1055
700	3092	0.075	822.6	993	0.990	1.137	803.4	950
705.4*	3206	0.051	904.2	904	1.059	1.059	873.6	874

* 临界温度。

† 实线上方是固态的性质,实线下方是液态的性质。

表 A2

温度 /K	压强 /bar	体积 $v/(m^3/kg)$		焓 $h/(kJ/kg)$		熵 $s/(kJ/kg \cdot K)$		内能 $u/(kJ/kg)$		比热 $c_p/(kJ/kg \cdot K)$	
		凝聚态 ⁺	蒸汽	凝聚态 ⁺	蒸汽	凝聚态 ⁺	蒸汽	凝聚态 ⁺	蒸汽	凝聚态 ⁺	蒸汽
200	0.000002	0.001079	569000	-467.5	2366	-1.789	12.38	-467.5	2274	1.545	1.545
220	0.000027	0.001082	38300	-435.0	2403	-1.633	11.20	-435.0	2302	1.701	1.701
240	0.000372	0.001085	4070	-400.1	2440	-1.478	10.35	-400.1	2289	1.857	1.857
260	0.00196	0.001088	612.2	-360.5	2477	-1.323	9.590	-360.5	2357	2.013	2.013
273.15	0.00611	0.001091	206.3	-333.5	2502	-1.221	9.158	-333.5	2376	2.116	2.116
273.15	0.00611	0.001000	206.3	0.0	2502	0.000	9.158	0.0	2376	4.217	1.85
280	0.00990	0.001000	130.4	28.8	2514	0.104	8.980	28.8	2385	4.198	1.85
290	0.01917	0.001001	68.7	70.7	2532	0.251	8.740	70.7	2398	4.184	1.86
300	0.03531	0.001003	39.13	112.5	2550	0.393	8.520	112.5	2412	4.179	1.87
310	0.06221	0.001007	22.93	154.3	2568	0.530	8.318	154.3	2424	4.178	1.88
320	0.1053	0.001011	13.98	196.1	2586	0.649	8.151	196.1	2439	4.180	1.89
330	0.1719	0.001016	8.82	237.9	2604	0.791	7.962	237.9	2452	4.184	1.91
340	0.2713	0.001021	5.74	279.8	2622	0.916	7.804	279.8	2466	4.188	1.93
350	0.4163	0.001027	3.846	321.7	2639	1.038	7.657	321.7	2479	4.195	1.95
360	0.6209	0.001034	2.645	363.7	2655	1.156	7.521	363.7	2491	4.203	1.98
370	0.9040	0.001041	1.861	405.8	2671	1.271	7.394	405.8	2503	4.214	2.01
373.15	1.0133	0.001044	1.679	419.1	2676	1.307	7.356	419.1	2506	4.217	2.02
380	1.2869	0.001049	1.337	448.0	2687	1.384	7.275	447.9	2515	4.226	2.05
400	2.445	0.001067	0.731	532.9	2716	1.605	7.058	532.6	2537	4.256	2.15
420	4.370	0.001088	0.425	618.6	2742	1.810	6.865	618.1	2556	4.302	2.29
440	7.333	0.001110	0.261	705.3	2764	2.011	6.689	704.5	2573	4.36	2.46
460	11.71	0.001137	0.167	793.5	2782	2.205	6.528	792.2	2586	4.44	2.68
480	17.90	0.001167	0.111	883.4	2795	2.395	6.377	881.3	2596	4.53	2.94
500	26.40	0.001203	0.0766	975.6	2801	2.581	6.233	972.4	2599	4.66	3.27
520	37.70	0.001244	0.0525	1071	2801	2.765	6.093	1066	2603	4.84	3.70
540	52.38	0.001294	0.0375	1170	2792	2.948	5.953	1163	2596	5.08	4.27
560	71.08	0.001355	0.0269	1273	2772	3.132	5.808	1263	2581	5.43	5.09
580	94.51	0.001433	0.0193	1384	2737	3.321	5.654	1370	2555	6.00	6.40
600	123.5	0.001541	0.0137	1506	2682	3.520	5.480	1487	2513	7.00	8.75
620	159.1	0.001705	0.0094	1647	2588	3.741	5.259	1620	2438	9.35	15.4
647.3*	221.2	0.003170	0.0032	2107	2107	4.443	4.443	2037	2037	∞	∞

* 临界温度。

† 实线上方是固态的性质,实线下方是液态的性质。

表 A3 $(v, ft^3/lb_m; h, Btu/lb_m; s, Btu/lb_m \cdot ^\circ R)$

饱和			温度/°F															
压强 (lb _r /in ²)	液体	蒸汽	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	
1 (101.7)	<i>v</i> 0.0161 <i>h</i> 69.7 <i>s</i> 0.133	333.6 1106 1.978	0.0160 18.1 0.036	0.0161 68.0 0.130	0.0163 112.8 2.015	362.6 1150 2.051	422.4 1173 2.084	452.3 1196 2.115	482.1 1219 2.144	511.9 1242 2.172	541.7 1265 2.198	571.5 1289 2.224	631.1 1336 2.271	690.7 1385 2.314	750.3 1434 2.355	809.8 1484 2.393	869.5 1535 2.429	
5 (162.2)	<i>v</i> 0.0164 <i>h</i> 130.2 <i>s</i> 0.235	73.53 1131 1.844	0.0160 18.1 0.036	0.0161 68.0 0.130	0.0163 118.0 2.015	78.14 1149 1.872	84.21 1172 1.905	90.24 1195 1.937	96.25 1218 1.966	102.24 1241 1.994	108.22 1265 2.021	114.21 1288 2.046	126.2 1336 2.093	138.1 1384 2.137	150.0 1434 2.178	161.9 1484 2.216	173.9 1535 2.252	
10 (193.2)	<i>v</i> 0.0166 <i>h</i> 161.3 <i>s</i> 0.284	38.42 1143 1.788	0.0160 18.1 0.036	0.0161 68.0 0.130	0.0163 118.0 2.015	38.84 1147 1.793	41.93 1170 1.827	44.98 1194 1.859	48.02 1217 1.889	51.03 1241 1.917	54.04 1264 1.944	57.04 1288 1.969	63.03 1334 2.017	69.00 1384 2.060	74.98 1433 2.101	80.94 1484 2.139	86.91 1535 2.176	
14.7 (212.0)	<i>v</i> 0.0167 <i>h</i> 180.2 <i>s</i> 0.312	26.79 1151 1.757	0.0160 18.1 0.036	0.0161 68.0 0.130	0.0163 118.0 2.015	0.0166 168.1 0.294	28.42 1169 1.783	30.52 1193 1.816	32.60 1216 1.846	34.67 1240 1.873	36.72 1264 1.900	38.77 1287 1.927	42.66 1335 1.974	46.93 1384 2.018	51.00 1433 2.059	55.06 1483 2.097	59.13 1535 2.133	
20 (228.0)	<i>v</i> 0.0168 <i>h</i> 196.3 <i>s</i> 0.336	20.09 1156 1.732	0.0160 18.1 0.036	0.0161 68.0 0.130	0.0163 118.0 2.015	0.0166 168.1 0.294	20.79 1167 1.748	22.36 1191 1.781	23.90 1215 1.811	25.43 1239 1.840	26.95 1263 1.867	28.46 1287 1.892	31.47 1335 1.940	34.47 1383 1.984	37.46 1433 2.024	40.45 1483 2.063	43.44 1534 2.099	
40 (267.3)	<i>v</i> 0.0172 <i>h</i> 236.2 <i>s</i> 0.392	10.50 1170 1.679	0.0160 18.2 0.036	0.0161 68.1 0.130	0.0163 118.0 2.015	0.0166 168.2 0.294	0.0170 218.6 0.368	11.04 1187 1.699	11.84 1212 1.731	12.62 1236 1.761	13.40 1261 1.788	14.16 1285 1.814	15.69 1334 1.862	17.20 1383 1.907	18.70 1432 1.948	20.20 1483 1.986	21.70 1534 2.022	
60 (292.7)	<i>v</i> 0.0174 <i>h</i> 262.2 <i>s</i> 0.427	7.176 1178 1.644	0.0160 18.2 0.036	0.0161 68.2 0.130	0.0163 118.1 2.015	0.0166 168.2 0.294	0.0170 218.7 0.368	7.258 1182 1.649	7.815 1208 1.683	8.354 1234 1.713	8.881 1259 1.742	9.400 1283 1.768	10.43 1332 1.817	11.44 1382 1.861	12.45 1431 1.902	13.45 1482 1.941	14.45 1533 1.977	
80 (312.0)	<i>v</i> 0.0176 <i>h</i> 282.1 <i>s</i> 0.453	5.472 1183 1.621	0.0160 18.3 0.036	0.0161 68.2 0.130	0.0163 118.1 2.015	0.0166 168.2 0.294	0.0170 218.7 0.368	0.0175 269.7 0.437	5.801 1204 1.647	6.218 1231 1.679	6.621 1256 1.708	7.017 1281 1.735	7.794 1331 1.784	8.560 1381 1.829	9.320 1431 1.870	10.08 1481 1.909	10.83 1533 1.945	
100 (327.8)	<i>v</i> 0.0177 <i>h</i> 298.5 <i>s</i> 0.474	4.432 1187.5 1.603	0.0160 18.3 0.036	0.0161 68.3 0.130	0.0163 118.2 2.015	0.0166 168.3 0.294	0.0170 218.7 0.368	0.0175 269.8 0.437	4.591 1200 1.619	4.935 1227 1.652	5.266 1254 1.681	5.587 1279 1.709	6.216 1329 1.759	6.834 1379 1.803	7.444 1430 1.845	8.051 1480 1.884	8.656 1532 1.920	
150 (358.4)	<i>v</i> 0.0181 <i>h</i> 330.5 <i>s</i> 0.514	3.015 1194.5 1.570	0.0160 18.5 0.036	0.0161 68.4 0.130	0.0163 118.3 2.015	0.0166 168.4 0.294	0.0170 218.8 0.368	0.0175 269.9 0.437	0.0179 321.8 0.503	3.221 1247 1.599	3.456 1274 1.631	3.680 1297 1.660	4.111 1326 1.711	4.530 1377 1.757	4.943 1428 1.799	5.352 1479 1.838	5.758 1531 1.875	

200 (381.8)	ν	0.0184	2.288	0.0160	0.0161	0.0163	0.0166	0.0170	0.0174	0.0180	2.360	2.548	2.724	3.058	3.379	3.692	4.002	4.309
	h	355.5	1198.8	18.6	68.5	118.4	168.5	218.9	270.0	321.9	1210	1241	1269	1322	1374	1426	1477	1529
	s	0.544	1.546	0.036	0.129	0.215	0.294	0.368	0.437	0.503	1.559	1.594	1.624	1.677	1.723	1.766	1.806	1.843
250 (401.0)	ν	0.0187	1.844	0.0160	0.0161	0.0163	0.0166	0.0170	0.0174	0.0180	0.0186	2.002	2.150	2.426	2.687	2.942	3.192	3.439
	h	376.1	1202	18.8	68.7	118.6	168.6	219.1	270.1	321.9	375.1	1235	1263	1319	1372	1423	1475	1528
	s	0.568	1.527	0.036	0.129	0.215	0.294	0.367	0.437	0.503	0.567	1.563	1.595	1.649	1.697	1.740	1.780	1.817
300 (447.4)	ν	0.0189	1.543	0.0160	0.0161	0.0163	0.0166	0.0170	0.0174	0.0180	0.0186	1.836	1.766	2.004	2.226	2.441	2.652	2.859
	h	393.5	1203	18.9	68.8	118.7	168.7	219.2	270.1	322.0	375.2	1226	1258	1315	1368	1421	1474	1527
	s	0.588	1.511	0.036	0.129	0.215	0.294	0.367	0.437	0.503	0.567	1.536	1.570	1.627	1.675	1.719	1.759	1.796
400 (444.6)	ν	0.0193	1.161	0.0160	0.0161	0.0163	0.0166	0.0170	0.0174	0.0180	0.0186	1.175	1.284	1.476	1.650	1.815	1.977	2.135
	h	424.2	1205	19.2	69.1	118.9	168.9	219.4	270.3	322.2	375.3	1209	1245	1307	1363	1417	1470	1524
	s	0.622	1.485	0.036	0.129	0.215	0.294	0.367	0.437	0.503	0.566	1.489	1.528	1.590	1.640	1.685	1.725	1.763
500 (467.0)	ν	0.0198	0.928	0.0160	0.0161	0.0163	0.0166	0.0170	0.0174	0.0180	0.0186	0.0194	0.992	1.158	1.304	1.440	1.572	1.700
	h	449.5	1205	19.4	69.3	119.1	169.2	219.6	270.5	322.3	375.4	430.3	1231	1299	1357	1412	1467	1521
	s	0.649	1.464	0.036	0.129	0.215	0.293	0.367	0.436	0.502	0.566	0.628	1.492	1.559	1.612	1.658	1.699	1.737
600 (486.2)	ν	0.0201	0.770	0.0160	0.0161	0.0163	0.0166	0.0170	0.0174	0.0180	0.0186	0.0194	0.795	0.950	1.073	1.189	1.302	1.410
	h	471.7	1204	19.8	69.6	119.4	169.4	219.8	270.7	322.5	375.5	430.3	1216	1290	1351	1408	1463	1518
	s	0.672	1.446	0.036	0.129	0.215	0.293	0.367	0.436	0.502	0.566	0.628	1.459	1.532	1.588	1.635	1.677	1.716
800 (518.3)	ν	0.0209	0.569	0.0160	0.0161	0.0163	0.0166	0.0170	0.0174	0.0179	0.0186	0.0194	0.0204	0.678	0.783	0.876	0.963	1.048
	h	509.7	1199.3	20.4	70.1	119.9	169.9	220.2	271.1	322.8	375.7	430.4	487.9	1271	1339	1398	1456	1512
	s	0.711	1.416	0.036	0.129	0.214	0.293	0.367	0.436	0.502	0.565	0.627	0.689	1.486	1.547	1.597	1.641	1.681
1000 (544.7)	ν	0.0216	0.446	0.0160	0.0161	0.0163	0.0166	0.0169	0.0174	0.0179	0.0186	0.0193	0.0204	0.514	0.608	0.688	0.760	0.830
	h	542.5	1193	20.9	70.6	120.4	170.3	220.6	271.4	323.1	376.0	430.6	487.8	1249	1325	1390	1448	1506
	s	0.743	1.391	0.036	0.129	0.214	0.293	0.366	0.436	0.501	0.565	0.626	0.688	1.445	1.514	1.567	1.612	1.653
1500 (596.3)	ν	0.0235	0.277	0.0160	0.0161	0.0163	0.0166	0.0169	0.0174	0.0179	0.0185	0.0193	0.0203	0.282	0.372	0.435	0.490	0.540
	h	611.6	1169	22.4	72.0	121.6	171.5	221.7	272.4	323.9	376.6	430.9	487.6	1175	1288	1363	1429	1490
	s	0.808	1.337	0.036	0.129	0.214	0.292	0.366	0.435	0.500	0.563	0.625	0.686	1.342	1.444	1.507	1.557	1.600
2000 (635.9)	ν	0.0257	0.188	0.0159	0.0160	0.0162	0.0165	0.0169	0.0173	0.0178	0.0184	0.0192	0.0201	0.0233	0.249	0.307	0.353	0.394
	h	672.0	1137	23.8	73.3	122.8	172.6	222.7	273.3	324.7	377.2	431.2	487.5	614.5	1240	1335	1408	1474
	s	0.862	1.287	0.036	0.128	0.213	0.292	0.365	0.434	0.499	0.562	0.623	0.683	0.809	1.379	1.457	1.513	1.560
2500 (668.2)	ν	0.0286	0.131	0.0159	0.0160	0.0162	0.0165	0.0169	0.0173	0.0178	0.0184	0.0191	0.0200	0.0230	0.168	0.229	0.271	0.307
	h	731.3	1092	25.2	74.6	124.1	173.7	223.8	274.3	325.5	377.8	431.6	487.5	612.1	1177	1303	1386	1457
	s	0.914	1.234	0.036	0.128	0.213	0.291	0.364	0.433	0.498	0.561	0.622	0.682	0.805	1.307	1.412	1.476	1.527
3000 (695.4)	ν	0.0343	0.085	0.0159	0.0160	0.0162	0.0165	0.0168	0.0172	0.0177	0.0183	0.0191	0.0200	0.0228	0.098	0.176	0.216	0.248
	h	802.2	1017	26.4	75.6	125.0	174.9	224.8	275.2	326.4	378.5	432.0	487.5	610.1	1059	1266	1362	1440
	s	0.973	1.160	0.036	0.128	0.212	0.290	0.363	0.432	0.497	0.560	0.620	0.680	0.801	1.195	1.368	1.442	1.497

表 A4

压强 /bar	温度 /K	体积/(m ³ /kg)			焓/(kJ/kg)			熵/(kJ/kg·K)			内能/(kJ/kg)			比热/(kJ/kg·K)	
		液体 10 ³ v _f	蒸汽 v _g	液体 h _f	蒸汽 h _g	液体 s _f	蒸汽 s _g	液体 u _f	蒸汽 u _g	液体 (c _p) _f	蒸汽 (c _p) _g				
0.10	319.0	1.010	14.67	191.8	2584	0.649	8.148	191.8	2437	4.18	1.91				
0.15	327.1	1.014	10.02	226.0	2598	0.755	8.006	226.0	2448	4.18	1.92				
0.20	333.2	1.017	7.650	251.5	2609	0.832	7.907	251.5	2456	4.19	1.92				
0.25	338.1	1.020	6.204	272.0	2617	0.893	7.830	272.0	2462	4.19	1.93				
0.30	342.2	1.022	5.230	289.3	2625	0.944	7.767	289.3	2468	4.19	1.94				
0.4	349.0	1.026	3.993	317.6	2636	1.026	7.669	317.6	2476	4.20	1.96				
0.5	354.5	1.030	3.241	340.6	2646	1.091	7.594	340.5	2484	4.20	1.97				
0.6	359.1	1.033	2.732	359.9	2654	1.145	7.532	359.8	2490	4.20	1.98				
0.8	366.7	1.039	2.088	391.7	2666	1.233	7.435	391.6	2499	4.21	2.01				
1.0	372.8	1.043	1.694	417.5	2675	1.303	7.360	417.4	2506	4.22	2.03				
1.5	384.5	1.053	1.159	467.2	2693	1.434	7.223	467.0	2519	4.23	2.04				
2.0	393.4	1.061	0.886	504.7	2706	1.530	7.127	504.5	2529	4.24	2.13				
2.5	400.6	1.067	0.719	535.4	2717	1.607	7.052	535.1	2537	4.26	2.17				
3.0	406.7	1.073	0.606	561.5	2726	1.672	6.991	561.2	2544	4.27	2.20				
4.0	416.8	1.084	0.462	604.8	2738	1.777	6.895	604.4	2553	4.29	2.25				
5	425.0	1.094	0.375	640.3	2748	1.861	6.820	639.8	2561	4.31	2.34				
6	432.0	1.101	0.317	670.6	2756	1.931	6.759	669.9	2566	4.33	2.40				
8	443.6	1.115	0.240	721.1	2768	2.046	6.661	720.2	2576	4.37	2.51				
10	453.1	1.127	0.194	762.7	2777	2.138	6.584	761.6	2583	4.40	2.60				
15	471.5	1.154	0.132	844.8	2791	2.315	6.442	843.1	2593	4.49	2.86				
20	485.5	1.177	0.100	908.6	2798	2.447	6.338	906.2	2598	4.56	3.09				
25	497.1	1.197	0.0799	962.0	2802	2.554	6.255	959.0	2602	4.60	3.30				
30	506.8	1.216	0.0666	1008.4	2803	2.646	6.185	1004.8	2603	4.64	3.30				
40	523.5	1.252	0.0498	1087.3	2801	2.797	6.069	1082.3	2602	4.87	3.93				
50	537.1	1.286	0.0394	1154.4	2794	2.921	5.974	1148.0	2597	5.04	4.36				
60	548.8	1.319	0.0324	1214	2784	3.027	5.890	1206	2590	5.23	4.81				
80	568.2	1.384	0.0235	1317	2759	3.207	5.745	1306	2571	5.66	5.83				
100	584.1	1.452	0.0180	1408	2726	3.360	5.617	1393	2546	6.19	7.07				
150	615.3	1.658	0.0103	1611	2612	3.685	5.314	1586	2458	8.63	12.70				
200	639.0	2.036	0.0059	1827	2416	4.015	4.937	1786	2298						

表 A5 ($v, \text{m}^3/\text{kg}; h, \text{kJ}/\text{kg}; s, \text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

压强 /bar		温度/K									
		350	360	370	380	390	400	420	440	460	480
1	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	321.8	363.8	405.9	448.0	490.4	532.9	575.4	617.9	660.4	702.9
	s	1.037	1.156	1.272	1.383	1.493	1.600	1.707	1.814	1.921	2.028
1.5	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	321.8	363.8	405.9	448.0	490.4	532.9	575.4	617.9	660.4	702.9
	s	1.037	1.156	1.272	1.383	1.493	1.600	1.707	1.814	1.921	2.028
2	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	321.8	363.8	405.9	448.0	490.4	532.9	575.4	617.9	660.4	702.9
	s	1.037	1.156	1.272	1.383	1.493	1.600	1.707	1.814	1.921	2.028
2.5	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	321.8	363.8	405.9	448.0	490.4	532.9	575.4	617.9	660.4	702.9
	s	1.037	1.156	1.272	1.383	1.493	1.600	1.707	1.814	1.921	2.028
3	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	321.9	364.0	406.0	448.1	490.5	533.0	575.5	618.0	660.5	703.0
	s	1.037	1.156	1.271	1.383	1.493	1.601	1.708	1.815	1.922	2.029
4	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	322.0	364.0	406.1	448.2	490.6	533.1	575.6	618.1	660.6	703.1
	s	1.037	1.155	1.271	1.383	1.493	1.601	1.708	1.815	1.922	2.029
5	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	322.1	364.1	406.2	448.3	490.6	533.1	575.6	618.1	660.6	703.1
	s	1.037	1.155	1.271	1.383	1.493	1.601	1.708	1.815	1.922	2.029
6	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	322.1	364.2	406.2	448.3	490.7	533.2	575.7	618.2	660.7	703.2
	s	1.037	1.155	1.271	1.383	1.493	1.600	1.709	1.816	1.923	2.030
7	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	322.2	364.2	406.3	448.4	490.8	533.3	575.8	618.3	660.8	703.3
	s	1.037	1.155	1.271	1.383	1.493	1.600	1.709	1.816	1.923	2.030
8	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.058, -3	1.067, -3	1.078, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	322.3	364.3	406.4	448.5	490.8	533.4	575.9	618.4	660.9	703.4
	s	1.037	1.155	1.271	1.383	1.493	1.600	1.709	1.816	1.923	2.030
9	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.057, -3	1.067, -3	1.077, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	322.4	364.4	406.5	448.6	490.9	533.4	576.0	618.5	661.0	703.5
	s	1.037	1.155	1.271	1.383	1.493	1.600	1.709	1.816	1.923	2.030
10	v	1.027, -3	1.034, -3	1.041, -3	1.049, -3	1.057, -3	1.067, -3	1.077, -3	1.087, -3	1.097, -3	1.107, -3
	h	322.5	364.5	406.6	448.6	490.9	533.4	576.0	618.5	661.0	703.5
	s	1.037	1.155	1.270	1.383	1.493	1.600	1.709	1.816	1.923	2.030

表 A5(续)

压强 /bar		温度/K										
		500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
1	<i>v</i>	2.298	2.531	2.763	2.996	3.227	3.459	3.690	3.291	4.132	4.383	4.614
	<i>h</i>	2928.7	3028	3129	3231	3334	3439	3546	3654	3764	3876	3990
	<i>s</i>	7.944	8.134	8.309	8.472	8.625	8.770	8.908	9.039	9.165	9.286	9.402
1.5	<i>v</i>	1.529	1.685	1.840	1.995	2.150	2.304	2.459	2.613	2.767	2.921	3.075
	<i>h</i>	2926.6	3027	3128	3230	3333	3438	3545	3654	3764	3876	3989
	<i>s</i>	7.754	7.945	8.121	8.284	8.438	8.583	8.720	8.855	8.978	9.099	9.214
2	<i>v</i>	1.144	1.262	1.378	1.495	1.612	1.728	1.844	1.959	2.075	2.191	2.306
	<i>h</i>	2924.6	3025	3127	3229	3333	3438	3545	3653	3763	3875	3989
	<i>s</i>	7.618	7.810	7.997	8.150	8.304	8.449	8.587	8.719	8.845	8.966	9.082
2.5	<i>v</i>	0.913	1.008	1.102	1.195	1.288	1.381	1.474	1.567	1.660	1.752	1.845
	<i>h</i>	2922.6	3024	3126	3228	3332	3437	3544	3653	3763	3875	3989
	<i>s</i>	7.512	7.705	7.882	8.046	8.200	8.346	8.484	8.615	8.741	8.862	8.979
3	<i>v</i>	0.760	0.839	0.917	0.995	1.073	1.151	1.228	1.305	1.383	1.460	1.537
	<i>h</i>	2920.6	3023	3125	3227	3331	3437	3544	3652	3763	3875	3988
	<i>s</i>	7.425	7.619	7.797	7.961	8.115	8.261	8.399	8.547	8.673	8.794	8.895
4	<i>v</i>	0.567	0.627	0.687	0.745	0.804	0.862	0.920	0.979	1.037	1.095	1.153
	<i>h</i>	2916.5	3020	3122	3226	3330	3435	3543	3651	3762	3874	3988
	<i>s</i>	7.286	7.483	7.662	7.827	7.981	8.127	8.265	8.395	8.523	8.645	8.761
5	<i>v</i>	0.452	0.500	0.548	0.595	0.643	0.689	0.736	0.782	0.829	0.875	0.922
	<i>h</i>	2912.4	3017	3120	3224	3328	3434	3542	3651	3761	3873	3987
	<i>s</i>	7.177	7.376	7.560	7.722	7.877	8.023	8.161	8.293	8.420	8.541	8.659
6	<i>v</i>	0.375	0.416	0.456	0.495	0.535	0.574	0.613	0.651	0.691	0.729	0.768
	<i>h</i>	2908.2	3014	3118	3222	3327	3433	3541	3650	3760	3873	3987
	<i>s</i>	7.086	7.288	7.469	7.636	7.791	7.938	8.076	8.209	8.334	8.456	8.574
7	<i>v</i>	0.320	0.355	0.390	0.424	0.458	0.492	0.525	0.558	0.592	0.625	0.658
	<i>h</i>	2903.9	3011	3116	3221	3326	3432	3540	3649	3760	3872	3986
	<i>s</i>	7.009	7.213	7.395	7.563	7.719	7.865	8.004	8.137	8.263	8.385	8.502
8	<i>v</i>	0.278	0.310	0.340	0.370	0.400	0.430	0.459	0.488	0.518	0.547	0.576
	<i>h</i>	2899.5	3008	3114	3219	3324	3431	3539	3648	3759	3871	3985
	<i>s</i>	6.940	7.147	7.331	7.499	7.656	7.803	7.942	8.074	8.201	8.323	8.440
9	<i>v</i>	0.246	0.275	0.302	0.328	0.355	0.382	0.408	0.434	0.460	0.486	0.512
	<i>h</i>	2895.0	3005	3112	3217	3323	3430	3538	3647	3757	3871	3985
	<i>s</i>	6.879	7.089	7.274	7.449	7.600	7.747	7.886	8.019	8.146	8.268	8.383
10	<i>v</i>	0.221	0.246	0.271	0.295	0.319	0.343	0.367	0.390	0.414	0.437	0.460
	<i>h</i>	2891.2	3002	3109	3215	3322	3428	3537	3646	3757	3870	3984
	<i>s</i>	6.823	7.036	7.223	7.443	7.550	7.697	7.837	7.962	8.097	8.219	8.336

表 A5(续)

压强 /bar		温度/K									
		360	380	400	440	480	500	550	600		
15	<i>v</i>	1.033. -3	1.049. -3	1.067. -3	1.110. -3	0.135	0.143	0.1617	0.179		
	<i>h</i>	364.8	449.0	533.7	705.8	2813.5	2866.2	2987	3098		
	<i>s</i>	1.155	1.382	1.600	2.009	6.490	6.598	6.827	7.022		
20	<i>v</i>	1.033. -3	1.048. -3	1.066. -3	1.110. -3	1.167. -3	0.104	0.1191	0.133		
	<i>h</i>	365.2	449.4	534.1	706.1	883.6	2839.4	2970	3087		
	<i>s</i>	1.154	1.382	1.599	2.008	2.395	6.422	6.571	6.875		
25	<i>v</i>	1.033. -3	1.048. -3	1.066. -3	1.109. -3	1.167. -3	0.0810	0.0936	0.105		
	<i>h</i>	365.6	449.7	534.4	706.4	883.7	2810.1	2952	3075		
	<i>s</i>	1.154	1.381	1.599	2.008	2.394	6.272	6.543	6.732		
30	<i>v</i>	1.033. -3	1.048. -3	1.065. -2	1.108. -3	1.166. -3	1.202. -3	0.0765	0.0863		
	<i>h</i>	366.0	450.1	534.8	706.6	883.9	975.5	2933	3062		
	<i>s</i>	1.154	1.381	1.598	2.008	2.393	2.580	6.432	6.657		
40	<i>v</i>	1.032. -3	1.047. -3	1.065. -3	1.108. -3	1.165. -3	1.201. -3	0.0549	0.0630		
	<i>h</i>	366.8	450.9	535.4	707.2	884.3	975.9	2892	3036		
	<i>s</i>	1.153	1.380	1.597	2.006	2.391	2.578	6.239	6.490		
50	<i>v</i>	1.032. -3	1.047. -3	1.064. -3	1.107. -3	1.164. -3	1.200. -3	0.0417	0.0490		
	<i>h</i>	367.5	451.6	536.0	707.7	884.6	976.1	2845	3013		
	<i>s</i>	1.152	1.380	1.596	2.005	2.390	2.575	6.022	6.350		
60	<i>v</i>	1.031. 3	1.046. -3	1.064. -3	1.107. -3	1.163. -3	1.198. 3	0.0327	0.0396		
	<i>h</i>	368.3	452.3	536.8	708.3	885.0	976.3	2791	2976		
	<i>s</i>	1.151	1.379	1.595	2.004	2.388	2.575	5.899	6.224		
70	<i>v</i>	1.031. -3	1.046. -3	1.063. -3	1.106. -3	1.162. -3	1.197. -3	1.321. -3	0.0328		
	<i>h</i>	369.1	453.0	537.5	708.9	885.4	976.6	1220	2943		
	<i>s</i>	1.151	1.378	1.594	2.003	2.387	2.573	3.037	6.109		
80	<i>v</i>	1.030. -3	1.045. -3	1.063. -3	1.105. -3	1.161. -3	1.196. -3	1.316. -3	0.0276		
	<i>h</i>	369.9	453.8	538.2	709.5	885.8	976.8	1220	2906		
	<i>s</i>	1.150	1.377	1.593	2.002	2.385	2.571	3.033	5.997		
90	<i>v</i>	1.030. -3	1.045. -3	1.062. -3	1.104. -3	1.160. -3	1.194. -3	1.315. -3	0.0235		
	<i>h</i>	370.6	454.5	538.9	710.0	886.2	977.1	1219	2865		
	<i>s</i>	1.147	1.376	1.593	2.000	2.383	2.569	3.030	5.888		
100	<i>v</i>	1.029. -3	1.044. -3	1.061. -3	1.104. -3	1.159. -3	1.193. -3	1.313. -3	0.0201		
	<i>h</i>	371.4	455.3	539.6	710.6	886.6	977.3	1219	2820		
	<i>s</i>	1.149	1.375	1.592	1.999	2.382	2.567	3.027	5.775		

表 A5(续)

压强 /bar		温度/K									
		650	700	750	800	850	900	950	1000		
15	<i>v</i>	0.189	0.212	0.228	0.244	0.259	0.275	0.291	0.306		
	<i>h</i>	3206	3314	3423	3532	3642	3754	3867	3981		
	<i>s</i>	7.179	7.355	7.504	7.645	7.779	7.906	8.029	8.146		
20	<i>v</i>	0.145	0.158	0.170	0.182	0.194	0.206	0.218	0.230		
	<i>h</i>	3198	3307	3417	3526	3637	3750	3863	3978		
	<i>s</i>	7.053	7.215	7.366	7.507	7.642	7.770	7.893	8.011		
25	<i>v</i>	0.115	0.125	0.135	0.145	0.155	0.164	0.173	0.183		
	<i>h</i>	3189	3300	3411	3521	3633	3746	3860	3976		
	<i>s</i>	6.940	7.104	7.257	7.400	7.535	7.664	7.788	7.906		
30	<i>v</i>	0.0958	0.104	0.112	0.120	0.129	0.137	0.145	0.153		
	<i>h</i>	3180	3293	3405	3516	3629	3742	3857	3973		
	<i>s</i>	6.845	7.013	7.167	7.311	7.447	7.577	7.701	7.820		
40	<i>v</i>	0.0703	0.0769	0.0834	0.0889	0.0959	0.102	0.108	0.114		
	<i>h</i>	3161	3278	3392	3506	3620	3737	3850	3967		
	<i>s</i>	6.690	6.864	7.023	7.151	7.306	7.462	7.563	7.682		
50	<i>v</i>	0.0551	0.0608	0.0661	0.0713	0.0763	0.0813	0.0862	0.0911		
	<i>h</i>	3140	3263	3380	3496	3611	3727	3844	3961		
	<i>s</i>	6.524	6.745	6.907	7.049	7.223	7.328	7.454	7.575		
60	<i>v</i>	0.0451	0.0500	0.0545	0.0589	0.0632	0.0674	0.0716	0.0757		
	<i>h</i>	3120	3247	3368	3485	3602	3719	3837	3955		
	<i>s</i>	6.455	6.644	6.810	6.965	7.104	7.237	7.365	7.486		
70	<i>v</i>	0.0378	0.0422	0.0463	0.0501	0.0539	0.0575	0.0611	0.0647		
	<i>h</i>	3098	3231	3355	3475	3593	3712	3830	3950		
	<i>s</i>	6.358	6.555	6.726	6.881	7.024	7.160	7.288	7.411		
80	<i>v</i>	0.0324	0.0346	0.0401	0.0436	0.0469	0.0501	0.0533	0.0564		
	<i>h</i>	3075	3214	3334	3454	3584	3704	3824	3944		
	<i>s</i>	6.268	6.431	6.610	6.809	6.983	7.092	7.221	7.345		
90	<i>v</i>	0.0281	0.0319	0.0353	0.0384	0.0414	0.0444	0.0472	0.0500		
	<i>h</i>	3050	3197	3329	3452	3575	3696	3817	3938		
	<i>s</i>	6.184	6.401	6.587	6.745	6.892	7.030	7.179	7.326		
100	<i>v</i>	0.0247	0.0283	0.0314	0.0343	0.0371	0.0398	0.0424	0.0449		
	<i>h</i>	3025	3179	3315	3442	3566	3688	3810	3935		
	<i>s</i>	6.105	6.334	6.521	6.685	6.836	6.975	7.107	7.233		

表 A5(续)

压强 /bar		温度/K									
		360	380	400	440	480	500	550	600		
150	<i>v</i>	1.027. -3	1.041. -3	1.059. -3	1.100. -3	1.154. -3	1.187. -3	1.300. -3	1.519. -3		
	<i>h</i>	375.4	459.0	543.1	713.5	888.6	978.8	1217	1499		
	<i>s</i>	1.145	1.371	1.587	1.993	2.374	2.558	3.011	3.501		
200	<i>v</i>	1.024. -3	1.039. -3	1.056. -3	1.096. -3	1.149. -3	1.181. -3	1.289. -3	1.483. -3		
	<i>h</i>	379.3	462.6	546.5	716.5	890.7	980.3	1216	1489		
	<i>s</i>	1.142	1.367	1.583	*1.987	2.366	2.549	2.998	3.469		
250	<i>v</i>	1.022. -3	1.037. -3	1.053. -3	1.093. -3	1.144. -3	1.175. -3	1.278. -3	1.454. -3		
	<i>h</i>	383.2	466.4	550.1	719.4	892.9	981.9	1216	1479		
	<i>s</i>	1.138	1.364	1.578	1.982	2.359	2.541	2.984	3.443		
300	<i>v</i>	1.019. -3	1.034. -3	1.050. -3	1.088. -3	1.140. -3	1.170. -3	1.269. -3	1.428. -3		
	<i>h</i>	387.1	470.1	553.5	722.5	895.2	983.7	1215	1472		
	<i>s</i>	1.135	1.360	1.574	1.976	2.352	2.533	2.969	3.419		
400	<i>v</i>	1.016. -3	1.029. -3	1.045. -3	1.083. -3	1.133. -3	1.160. -3	1.252. -3	1.393. -3		
	<i>h</i>	394.9	477.6	560.6	728.6	899.9	987.4	1215	1462		
	<i>s</i>	1.129	1.352	1.565	1.965	2.338	2.517	2.949	3.379		
500	<i>v</i>	1.011. -3	1.025. -3	1.041. -3	1.077. -3	1.123. -3	1.151. -3	1.236. -3	1.363. -3		
	<i>h</i>	402.8	485.0	567.8	734.7	904.9	991.5	1215	1456		
	<i>s</i>	1.122	1.345	1.557	1.955	2.325	2.502	2.928	3.346		
600	<i>v</i>	1.007. -3	1.021. -3	1.035. -3	1.071. -3	1.116. -3	1.142. -3	1.223. -3	1.337. -3		
	<i>h</i>	410.6	492.6	574.9	741.0	910.0	995.9	1217	1452		
	<i>s</i>	1.116	1.338	1.549	1.945	2.312	2.488	2.909	3.316		
700	<i>v</i>	1.003. -3	1.016. -3	1.031. -3	1.066. -3	1.109. -3	1.134. -3	1.210. -3	1.315. -3		
	<i>h</i>	419.4	500.1	582.1	747.4	915.3	1000.5	1219	1449		
	<i>s</i>	1.110	1.331	1.541	1.935	2.300	2.474	2.890	3.290		
800	<i>v</i>	0.999. -3	1.012. -3	1.027. 3	1.060. -3	1.102. -3	1.126. -3	1.199. -3	1.296. -3		
	<i>h</i>	426.3	504.4	589.3	753.9	920.7	1005.3	1222	1447		
	<i>s</i>	1.104	1.324	1.533	1.925	2.288	2.461	2.954	3.266		
900	<i>v</i>	0.996. -3	1.008. -3	1.022. -3	1.055. -3	1.096. -3	1.119. -3	1.189. -3	1.280. -3		
	<i>h</i>	434.2	515.2	596.5	760.4	926.3	1010.3	1225	1447		
	<i>s</i>	1.098	1.317	1.526	1.916	2.277	2.449	2.857	3.244		
1000	<i>v</i>	0.992. -3	1.004. -3	1.018. -3	1.050. -3	1.089. -3	1.112. -3	1.179. 3	1.265. -3		
	<i>h</i>	442.0	522.8	603.8	766.9	932.0	1015.4	1228	1447		
	<i>s</i>	1.092	1.311	1.518	1.907	2.266	2.437	2.842	3.223		

表 A5(续)

压强 /bar		温度/K									
		650	700	750	800	850	900	950	1000		
150	v	1.403, -2	1.724, -2	1.975, -2	2.195, -2	2.398, -2	2.590, -2	2.775, -2	2.954, -2		
	h	2871	3082	3243	3386	3519	3649	3777	3904		
	s	5.723	6.037	6.260	6.444	6.606	6.755	6.893	7.023		
200	v	7.706, -3	1.157, -2	1.386, -2	1.575, -2	1.743, -2	1.899, -2	2.045, -2	2.186, -2		
	h	2618	2965	3163	3325	3471	3609	3743	3874		
	s	5.251	5.770	6.043	6.252	6.429	6.587	6.732	6.867		
250	v	2.118, -3	7.986, -3	1.029, -2	1.201, -2	1.349, -2	1.483, -2	1.607, -2	1.726, -2		
	h	1893	2821	3075	3261	3421	3568	3708	3845		
	s	4.102	5.494	5.846	6.085	6.280	6.449	6.600	6.741		
300	v	1.828, -3	5.416, -3	7.864, -3	9.512, -3	1.087, -2	1.207, -2	1.316, -2	1.420, -2		
	h	1810	2635	2978	3193	3369	3526	3673	3816		
	s	3.959	5.179	5.657	5.934	6.147	6.327	6.490	6.633		
400	v	1.658, -3	2.630, -3	4.821, -3	6.391, -3	7.598, -3	8.619, -3	9.498, -3	1.038, -2		
	h	1755	2233	2756	3047	3250	3440	3603	3756		
	s	3.849	4.554	5.278	5.654	5.913	6.119	6.295	6.453		
500	v	1.561, -3	2.038, -3	3.218, -3	4.576, -3	5.808, -3	6.581, -3	7.357, -3	8.102, -3		
	h	1728	2084	2538	2895	3149	3354	3566	3697		
	s	3.782	4.308	4.935	5.397	5.705	5.940	6.133	6.302		
600	v	1.514, -3	1.831, -3	2.509, -3	3.496, -3	4.440, -3	5.257, -3	5.965, -3	6.605, -3		
	h	1711	2021	2394	2734	3040	3269	3464	3640		
	s	3.732	4.192	4.706	5.175	5.518	5.780	5.991	6.172		
700	v	1.470, -3	1.716, -3	2.166, -3	2.866, 3	3.620, -3	4.348, -3	4.985, -3	5.557, -3		
	h	1699	1986	2308	2648	2940	3188	3398	3584		
	s	3.691	4.116	4.560	4.998	5.354	5.637	5.864	6.055		
800	v	1.435, -3	1.639, -3	1.973, -3	2.484, -3	3.093, -3	3.704, -3	4.274, -3	4.792, -3		
	h	1691	1962	2254	2567	2858	3113	3335	3532		
	s	3.656	4.058	4.460	4.864	5.217	5.510	5.750	5.951		
900	v	1.406, -3	1.589, -3	1.849, -3	2.239, -3	2.728, -3	3.454, -3	3.742, -3	4.212, -3		
	h	1685	1946	2217	2508	2791	3049	3277	3482		
	s	3.625	4.012	4.386	4.761	5.105	5.399	5.647	5.856		
1000	v	1.381, -3	1.536, -3	1.760, -3	2.072, -3	2.467, -3	2.907, -3	3.337, -3	3.763, -3		
	h	1681	1931	2191	2465	2738	2995	3225	3435		
	s	3.597	3.972	4.327	4.701	5.012	5.305	5.555	5.727		

附录 B 大气压下过热空气的性质

- 表 B1 比体积、比焓、比熵、比内能、等压比热、比热之比、相对压强、相对体积与温度的关系——USCS 制(14.70psia)
- 表 B2 比体积、比焓、比熵、比内能、等压比热、比热之比、相对压强、相对体积与温度的关系——SI 制(1 bar)

表 B1

T /°R	v /(ft ³ /lb _m)	h /(Btu/lb _m)	s° /(Btu/lb _m · °R)	u /(Btu/lb _m)	c_p /(Btu/lb _m · °R)	k	P_r	V_r
400	10.06	95.44	1.5682	68.07	0.2404	1.399	0.856	745.2
420	10.57	100.25	1.5799	71.47	0.2403	1.399	1.015	659.9
440	11.08	105.07	1.5911	74.91	0.2403	1.400	1.196	586.7
460	11.63	109.84	1.6017	78.30	0.2402	1.400	1.394	526.2
480	12.10	114.65	1.6119	81.74	0.2402	1.400	1.619	472.8
500	12.61	119.5	1.6217	85.18	0.2402	1.400	1.868	426.8
520	13.11	124.2	1.6311	88.62	0.2402	1.400	2.140	387.5
540	13.61	129.1	1.6404	92.06	0.2403	1.400	2.442	352.6
560	14.12	133.9	1.6490	95.50	0.2403	1.400	2.779	321.3
580	14.63	138.7	1.6576	98.94	0.2405	1.399	3.150	293.6
600	15.13	143.5	1.6657	102.4	0.2406	1.399	3.546	269.8
620	15.64	148.3	1.6736	105.8	0.2408	1.399	3.978	248.5
640	16.14	153.1	1.6810	109.3	0.2410	1.398	4.432	230.3
660	16.64	157.9	1.6884	112.7	0.2413	1.398	4.938	213.1
680	17.15	162.8	1.6958	116.2	0.2416	1.397	5.482	197.8
700	17.65	167.6	1.7028	119.7	0.2419	1.396	6.066	183.4
750	18.91	179.7	1.7195	128.4	0.2425	1.394	7.767	154.0
800	20.18	191.9	1.7348	137.0	0.2436	1.392	9.702	131.5
850	21.44	204.1	1.7491	145.9	0.2448	1.389	11.97	113.3
900	22.70	216.4	1.7642	154.7	0.2460	1.387	14.90	96.3
950	23.96	228.5	1.777	163.7	0.248	1.383	17.99	84.21
1000	25.22	241.1	1.790	172.6	0.249	1.380	21.71	73.45
1100	27.74	266.2	1.815	190.8	0.252	1.375	30.44	57.63
1200	30.25	291.6	1.838	209.3	0.255	1.368	41.95	45.61
1300	32.81	317.2	1.856	228.1	0.258	1.360	56.80	36.50
1400	35.30	343.1	1.875	247.2	0.261	1.356	75.59	29.53
1500	37.81	369.5	1.894	266.7	0.264	1.350	98.85	24.20
1600	40.34	396.0	1.911	286.4	0.267	1.345	127.0	20.09
1700	42.86	422.9	1.927	306.4	0.270	1.340	160.4	16.90
1800	45.39	449.9	1.943	326.7	0.273	1.336	201.9	14.22
1900	47.90	477.2	1.958	347.2	0.275	1.333	250.6	12.09
2000	50.41	505.1	1.972	368.1	0.277	1.329	307.8	10.36
2100	52.94	532.6	1.985	388.9	0.279	1.326	375.5	8.919
2200	55.47	560.6	1.998	410.0	0.282	1.322	453.2	7.741
2300	57.99	589.0	2.011	431.5	0.284	1.318	545.1	6.728
2400	60.52	617.8	2.023	453.2	0.286	1.315	648.9	5.898
2500	63.04	646.6	2.035	475.2	0.288	1.312	769.7	5.180
2600	65.55	675.4	2.046	497.5	0.290	1.309	906.7	4.749
2700	68.06	705.0	2.057	519.9	0.293	1.306	1064.3	4.050
2800	70.59	734.7	2.067	542.7	0.295	1.303	1236.3	3.612
2900	73.11	764.8	2.077	565.9	0.298	1.300	1436	3.220
3000	75.63	794.9	2.087	589.1	0.301	1.294	1663	2.878
3200	80.68	855.5	2.106	636.0	0.306	1.288	2189	2.331
3400	85.71	917.4	2.125	684.6	0.313	1.280	2853	1.900
3600	90.76	980.2	2.141	733.2	0.320	1.273	3651	1.577
3800	95.80	1043.8	2.157	783.0	0.327	1.266	4583	1.322
4000	100.84	1108.7	2.172	833.8	0.334	1.258	5688	1.121

表 B2

T /K	v /(m ³ /kg)	h /(kJ/kg)	s° /(kJ/kg·K)	u /(kJ/kg)	c_p /(kJ/kg·K)	k	P_r	V_r
200	0.573	199.6	6.459	142.1	1.008	1.398	0.563	1021
220	0.630	219.8	6.555	156.7	1.006	1.399	0.828	763
240	0.688	239.9	6.643	171.0	1.005	1.400	1.123	614
260	0.746	260.0	6.723	185.3	1.005	1.400	1.486	502
280	0.804	280.1	6.797	199.7	1.005	1.400	1.926	417
300	0.861	300.2	6.867	214.1	1.005	1.400	2.451	351.3
320	0.919	320.4	6.932	228.5	1.006	1.399	3.073	298.9
340	0.976	340.5	6.993	242.9	1.007	1.399	3.801	256.8
360	1.034	360.6	7.050	257.2	1.009	1.398	4.645	222.5
380	1.091	380.9	7.105	271.8	1.011	1.397	5.619	194.1
400	1.148	401.2	7.157	286.4	1.013	1.395	6.732	170.6
420	1.206	421.5	7.206	300.9	1.016	1.394	7.999	150.7
440	1.264	441.8	7.254	315.4	1.019	1.392	9.432	133.9
460	1.320	462.2	7.290	330.2	1.022	1.390	11.049	119.5
480	1.378	482.7	7.343	345.0	1.026	1.389	12.861	107.1
500	1.436	503.4	7.385	359.8	1.030	1.387	14.89	96.40
550	1.579	555.1	7.483	397.2	1.042	1.380	20.99	75.21
600	1.723	607.4	7.574	435.1	1.051	1.376	28.81	59.78
650	1.866	660.4	7.675	473.8	1.065	1.369	38.68	48.24
700	2.009	713.8	7.738	512.9	1.075	1.364	50.98	39.41
750	2.153	767.8	7.812	552.5	1.089	1.358	66.11	32.56
800	2.296	822.5	7.883	592.9	1.099	1.354	84.51	27.11
850	2.440	877.8	7.950	633.8	1.112	1.348	106.69	22.87
900	2.584	933.5	8.014	675.1	1.121	1.344	133.25	19.39
950	2.727	990.0	8.074	717.3	1.133	1.339	164.74	16.55
1000	2.871	1047	8.133	759.7	1.141	1.336	201.9	14.22
1050	3.014	1104	8.189	802.6	1.150	1.333	245.3	12.29
1100	3.157	1162	8.242	846.3	1.159	1.329	295.6	10.68
1150	3.301	1220	8.294	890.0	1.166	1.327	353.8	9.33
1200	3.445	1278	8.344	933.5	1.175	1.324	420.9	8.19
1250	3.588	1337	8.392	978.7	1.183	1.320	497.5	7.213
1300	3.732	1397	8.438	1024	1.191	1.317	584.7	6.382
1350	3.876	1457	8.483	1069	1.199	1.314	683.7	5.668
1400	4.019	1517	8.527	1115	1.207	1.312	795.6	5.051
1450	4.162	1578	8.569	1162	1.216	1.309	921.3	4.518
1500	4.305	1640	8.610	1209	1.225	1.306	1063	4.052
1550	4.449	1702	8.649	1257	1.235	1.303	1220	3.646
1600	4.593	1765	8.688	1305	1.245	1.301	1397	3.287
1650	4.736	1828	8.726	1354	1.255	1.296	1592	2.975
1700	4.880	1891	8.762	1403	1.266	1.293	1808	2.698
1750	5.024	1954	8.798	1452	1.276	1.290	2048	2.453
1800	5.167	2018	8.833	1501	1.287	1.287	2312	2.235
1850	5.310	2083	8.867	1552	1.298	1.283	2603	2.040
1900	5.454	2148	8.900	1603	1.311	1.279	2921	1.867
1950	5.597	2214	8.932	1654	1.324	1.276	3270	1.712
2000	5.741	2280	8.964	1705	1.337	1.273	3650	1.573

附录 C 氟里昂(R12)的性质

表 C1	饱和 R12 的性质随温度的变化——USCS 制
表 C2	饱和 R12 的性质随温度的变化——SI 制
表 C3	饱和 R12 的性质随压强的变化——USCS 制
表 C4	饱和 R12 的性质随压强的变化——SI 制
表 C5	过热 R12 的比体积、比焓、比熵与压强、温度的关系——USCS 制
表 C6	过热 R12 的比体积、比焓、比熵与压强、温度的关系——SI 制

表 C1

T /°F	P /psia	v_f /(ft ³ /lb _m)	v_g /(ft ³ /lb _m)	h_f /(Btu/lb _m)	h_g /(Btu/lb _m)	s_f /(Btu/lb _m · °R)	s_g /(Btu/lb _m · °R)
-140	0.256	0.00966	110.46	-20.65	61.90	-0.0561	0.2021
-120	0.642	0.00982	46.74	-16.57	64.05	-0.0437	0.1936
-100	1.428	0.00999	22.16	-12.47	66.25	-0.0320	0.1868
-80	2.881	0.01016	11.53	-8.35	68.47	-0.0209	0.1814
-60	5.358	0.01036	6.48	-4.19	70.69	-0.0102	0.1771
-40	9.308	0.01056	3.875	0.00	72.91	0.0000	0.1753
-30	11.999	0.01067	3.059	2.11	74.02	0.0050	0.1723
-20	15.267	0.01079	2.443	4.24	75.11	0.0098	0.1710
-10	19.189	0.01091	1.973	6.37	76.20	0.0146	0.1699
0	23.849	0.01103	1.609	8.52	77.27	0.0193	0.1688
10	29.335	0.01116	1.324	10.68	78.34	0.0240	0.1680
20	35.736	0.01130	1.099	12.86	79.39	0.0285	0.1672
30	43.148	0.01144	0.919	15.06	80.42	0.0330	0.1665
40	51.667	0.01159	0.774	17.27	81.44	0.0375	0.1659
50	61.394	0.01175	0.656	19.51	82.43	0.0418	0.1653
60	72.43	0.01191	0.558	21.77	83.41	0.0462	0.1648
70	84.89	0.01209	0.478	24.05	84.36	0.0505	0.1643
80	98.87	0.01228	0.411	26.37	85.28	0.0548	0.1639
90	114.49	0.01248	0.355	28.71	86.17	0.0590	0.1635
100	131.86	0.01269	0.308	31.10	87.03	0.0632	0.1632
110	151.11	0.01292	0.278	33.53	87.84	0.0675	0.1628
120	172.35	0.01317	0.233	36.01	88.61	0.0717	0.1624
130	195.71	0.01345	0.204	38.55	89.32	0.0759	0.1620
140	221.32	0.01375	0.178	41.16	89.97	0.0802	0.1616
150	249.32	0.01408	0.156	43.84	90.55	0.0845	0.1611
160	279.8	0.01445	0.136	46.63	91.01	0.0889	0.1605
180	349.0	0.01536	0.103	52.56	91.56	0.0980	0.1590
200	430.1	0.01666	0.077	59.20	91.28	0.1079	0.1565
220	524.4	0.01899	0.053	67.25	89.04	0.1194	0.1515
233.6	596.9	0.02870	0.029	78.86	78.86	0.1359	0.1359

表 C2

T/K	P/bar	$v_f/(\text{m}^3/\text{kg})$	$v_g/(\text{m}^3/\text{kg})$	$h_f/(\text{kJ}/\text{kg})$	$h_g/(\text{kJ}/\text{kg})$	$s_f/(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})$	$s_g/(\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})$
200	0.0996	0.0006217	1.370	334.8	518.1	3.724	4.640
210	0.1879	0.0006321	0.7591	343.2	522.7	3.765	4.620
220	0.3318	0.0006431	0.4477	351.8	527.4	3.805	4.603
230	0.5531	0.0006549	0.2784	360.6	532.1	3.844	4.590
240	0.8782	0.0006675	0.1811	369.5	536.8	3.881	4.579
250	1.336	0.0006810	0.1225	378.5	541.5	3.918	4.570
260	1.959	0.0006955	0.0856	387.7	546.1	3.954	4.563
270	2.784	0.0007112	0.0615	397.0	550.7	3.989	4.558
280	3.845	0.0007282	0.0475	406.5	555.1	4.023	4.554
290	5.184	0.0007470	0.0339	416.1	559.4	4.057	4.551
300	6.841	0.0007678	0.0258	426.0	563.5	4.090	4.548
310	8.859	0.0007909	0.0199	436.0	567.3	4.121	4.546
320	11.29	0.0008173	0.0155	446.2	570.9	4.154	4.543
330	14.17	0.0008478	0.0122	456.8	574.0	4.186	4.541
340	17.58	0.0008840	0.0096	467.8	576.5	4.218	4.537
350	21.57	0.000929	0.0075	479.4	578.2	4.250	4.533
360	26.20	0.000987	0.0058	492.1	578.7	4.285	4.525
370	31.56	0.001072	0.0044	506.4	577.1	4.322	4.514
380	37.76	0.001237	0.0031	524.7	570.5	4.369	4.490
385.1	41.25	0.001875	0.0019	551.1	551.1	4.437	4.437

表 C3

P /psia	T /°F	v_f /(ft ³ /lb _m)	v_g /(ft ³ /lb _m)	h_f /(Btu/lb _m)	h_g /(Btu/lb _m)	s_f /(Btu/lb _m · °R)	s_g /(Btu/lb _m · °R)
1	-109.2	0.00991	30.90	-14.36	65.23	-0.0373	0.1898
1.5	-98.7	0.00999	20.92	-12.20	66.39	-0.0313	0.1864
2	-90.7	0.01007	16.20	-10.56	67.28	-0.0268	0.1842
2.5	-84.3	0.01013	13.16	-9.22	67.99	-0.0232	0.1825
3	-78.8	0.01017	11.11	-8.09	68.60	-0.0202	0.1811
4	-69.7	0.01026	8.50	-6.21	69.61	-0.0153	0.1791
5	-62.4	0.01033	6.91	-4.68	70.43	-0.0114	0.1776
6	-56.1	0.01040	5.83	-3.37	71.13	-0.0082	0.1764
8	-45.7	0.01050	4.46	-1.20	72.28	-0.0023	0.1746
10	-37.2	0.01059	3.625	0.58	73.22	0.0014	0.1733
15	-20.8	0.01078	2.484	4.08	75.03	0.0094	0.1711
20	-8.1	0.01093	1.938	6.56	76.40	0.0155	0.1697
25	2.2	0.01106	1.539	9.00	77.51	0.0205	0.1687
30	11.1	0.01118	1.321	10.71	78.35	0.0240	0.1680
40	25.9	0.01138	0.987	14.16	80.00	0.0316	0.1667
50	38.2	0.01156	0.798	16.86	81.25	0.0366	0.1660
60	48.6	0.01172	0.670	19.20	82.30	0.0412	0.1654
80	66.2	0.01202	0.507	23.18	84.00	0.0489	0.1645
100	80.8	0.01229	0.407	26.54	85.35	0.0555	0.1639
150	109.5	0.01291	0.270	33.40	87.80	0.0672	0.1628
200	131.7	0.01350	0.199	39.00	89.44	0.0767	0.1620
250	150.2	0.01409	0.155	43.91	90.55	0.0846	0.1611
300	166.2	0.01470	0.125	48.41	91.24	0.0917	0.1601
400	192.9	0.01614	0.086	56.75	91.51	0.1038	0.1576
500	215.1	0.01828	0.059	65.06	89.92	0.1163	0.1532
596.9 ^c	233.6	0.02870	0.029	78.86	78.86	0.1359	0.1359

^c 为临界点。

表 C4

P /bar	T /K	$10^4 v_f$ /(m ³ /kg)	v_g /(m ³ /kg)	h_f /(kJ/kg)	h_g /(kJ/kg)	s_f /(kJ/kg·K)	s_g /(kJ/kg·K)
0.10	200.1	6.217	1.365	334.8	518.1	3.724	4.640
0.15	206.3	6.282	0.936	340.1	521.0	3.750	4.627
0.20	211.1	6.332	0.716	344.1	523.2	3.769	4.618
0.25	214.9	6.374	0.582	347.4	525.0	3.785	4.611
0.30	218.2	6.411	0.491	350.2	526.5	3.798	4.606
0.4	223.5	6.437	0.376	354.9	529.1	3.819	4.598
0.5	227.9	6.525	0.306	358.8	531.2	3.836	4.592
0.6	231.7	6.570	0.254	362.1	532.9	3.850	4.588
0.8	237.9	6.648	0.198	367.6	535.8	3.874	4.581
1.0	243.0	6.719	0.160	372.1	538.2	3.893	4.576
1.5	253.0	6.859	0.110	381.2	542.9	3.929	4.568
2.0	260.6	6.970	0.0840	388.2	546.4	3.956	4.563
2.5	266.9	7.067	0.0681	394.0	549.2	3.978	4.560
3.0	272.3	7.183	0.0573	399.1	551.6	3.997	4.557
4.0	281.3	7.307	0.0435	407.6	555.6	4.027	4.553
5.0	288.8	7.444	0.0351	414.8	558.8	4.052	4.551
6.0	295.2	7.571	0.0294	421.1	561.5	4.073	4.549
8.0	306.0	7.804	0.0221	431.8	565.7	4.108	4.546
10	314.9	8.022	0.0176	440.8	569.0	4.137	4.544
15	332.6	8.548	0.0114	459.3	574.5	4.193	4.539
20	346.3	9.096	0.0082	474.8	577.5	4.237	4.534
25	357.5	9.715	0.0062	488.7	578.5	4.275	4.527
30	367.2	10.47	0.0048	502.0	577.6	4.311	4.517
35	375.7	11.49	0.0036	515.9	574.1	4.347	4.502
40	383.3	13.45	0.0025	532.7	564.1	4.389	4.471
41.2 ^c	385.0	17.92	0.0018	548.3	548.3	4.429	4.429

^c 为临界点.

表 C6($v, \text{m}^3/\text{kg}; h, \text{kJ}/\text{kg}; s, \text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

压强 /bar	温度/K										
	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340	350
v	0.1658	0.1733	0.1807	0.1880	0.1952	0.2024	0.2096	0.2167	0.2238	0.2311	0.2382
1.0 h	542.4	548.1	553.9	559.9	565.9	572.1	578.2	584.5	591.0	597.4	603.9
s	4.593	4.615	4.638	4.663	4.681	4.701	4.721	4.741	4.761	4.780	4.803
v		0.1138	0.1187	0.1238	0.1287	0.1336	0.1385	0.1434	0.1482	0.1531	0.1579
1.5 h		547.0	553.0	559.1	565.2	571.4	577.6	584.0	590.6	596.8	603.5
s		4.585	4.607	4.629	4.651	4.672	4.692	4.712	4.732	4.752	4.770
v			0.0877	0.0916	0.0955	0.0992	0.1031	0.1067	0.1105	0.1140	0.1177
2.0 h			552.1	558.3	564.5	570.8	577.0	583.4	589.8	596.3	603.1
s			4.585	4.608	4.629	4.650	4.671	4.691	4.711	4.730	4.750
v			0.0691	0.0723	0.0755	0.0786	0.0816	0.0847	0.0876	0.0906	0.0936
2.5 h			551.1	557.4	563.7	570.0	576.4	582.8	589.0	595.8	602.6
s			4.567	4.590	4.612	4.634	4.654	4.675	4.694	4.714	4.734
v				0.0594	0.0621	0.0648	0.0674	0.0700	0.0726	0.0750	0.0776
3 h				556.5	563.3	569.3	575.7	582.2	588.7	595.3	602.2
s				4.575	4.598	4.619	4.640	4.661	4.681	4.701	4.720
v					0.0454	0.0475	0.0496	0.0516	0.0536	0.0555	0.0575
4 h					561.3	567.9	574.5	581.1	587.9	594.3	601.3
s					4.574	4.596	4.618	4.639	4.659	4.679	4.699
v					0.0348	0.0371	0.0388	0.0405	0.0422	0.0438	0.0454
5 h					559.6	566.4	573.1	579.8	586.8	593.3	600.3
s					4.554	4.577	4.599	4.621	4.642	4.661	4.682
v						0.0301	0.0316	0.0331	0.0345	0.0359	0.0377
6 h						564.8	571.7	578.6	585.4	592.3	599.4
s						4.561	4.583	4.605	4.626	4.647	4.667
v							0.0226	0.0238	0.0250	0.0261	0.0272
8 h							568.6	575.9	583.0	590.1	597.4
s							4.556	4.579	4.601	4.622	4.643
v								0.0182	0.0192	0.0202	0.0211
10 h								572.8	580.3	587.7	595.0
s								4.557	4.580	4.602	4.623

附录 D 25 种常用流体的分子量和临界参数

表 D1 25 种常用流体的分子量和临界参数

表 D1

流体介质	分子式	摩尔质量	P_c		V_c		T_c		Z_c
		/(kg/kmol)	/bar	/psia	/(m ³ /kg)	/(ft ³ /lb _m)	/K	/°R	
		/(lb _m /lb _m mole)							
空气	混合物	28.966	37.7	547	0.00320	0.0513	132.6	238.7	0.263
氨	NH ₃	17.031	112.9	1638	0.00427	0.0684	405.7	730.3	0.244
氩	Ar	39.948	48.7	706	0.00187	0.0300	150.8	271.4	0.290
丁烷	C ₄ H ₁₀	58.124	38.0	551	0.00439	0.0703	425.2	765.4	0.274
二氧化碳	CO ₂	44.010	73.8	1070	0.00214	0.0343	304.1	547.4	0.274
一氧化碳	CO	28.010	35.0	508	0.00332	0.0532	132.9	239.2	0.275
氯气	Cl ₂	70.906	77.0	1117	0.00175	0.0280	417.2	751.0	0.278
乙烷	C ₂ H ₆	30.070	48.8	708	0.00486	0.0778	305.4	549.7	0.281
氦	He	4.003	2.3	33	0.0144	0.2307	5.2	9.4	0.303
氢气	H ₂	2.016	13.0	189	0.0323	0.5174	33.3	59.9	0.305
汞	Hg	200.59	1500	21750	0.00018	0.0029	1720	3100	0.383
甲醇	CH ₃ OH	32.042	79.5	1153	0.00368	0.0589	512.6	923	0.220
氯甲烷	CH ₃ Cl	50.487	66.8	969	0.00270	0.0432	416.3	749.3	0.277
氖	Ne	20.179	27.6	400	0.00207	0.0332	44.4	79.9	0.311
一氧化氮	NO	30.006	64.9	941	0.00192	0.0308	180.0	324.0	0.249
氮气	N ₂	28.013	34.0	493	0.00318	0.0509	126.2	227.2	0.287
氧化亚氮	N ₂ O	44.013	72.4	1050	0.00221	0.0354	309.6	557.3	0.274
氧气	O ₂	31.999	50.4	731	0.00229	0.0367	154.6	278.3	0.288
钾	K	39.098	170	2466			2210	3980	
丙烷	C ₃ H ₈	44.097	42.6	618	0.00444	0.0711	370.0	666.0	0.271
氟里昂 12	CF ₂ Cl ₂	120.910	41.2	598	0.0179	0.2867	385.2	693.4	0.278
氟里昂 22	CHF ₂ Cl	86.469	49.8	722	0.0191	0.3060	369.2	664.6	0.267
钠	Na	22.990	370	5365			2500	4500	
二氧化硫	SO ₂	64.059	78.8	1143	0.0190	0.3043	430.7	775.3	0.269
水	H ₂ O	18.016	220.6	3200	0.00311	0.0500	647.1	1164.8	0.234

附录 E 压缩系数图

- 图 E1 $0.00 \leq P_r \leq 0.06$ 和 $0.55 \leq T_r \leq 0.80$ 时的(超临界)Z 值
 图 E2 $0.05 \leq P_r \leq 0.11$ 和 $0.64 \leq T_r \leq 0.80$ 时的(超临界)Z 值
 图 E3 $0.00 \leq P_r \leq 1.00$ 和 $0.60 \leq T_r \leq 5.00$ 时的 Z 值,并显示超临界的等体积线

图 E1

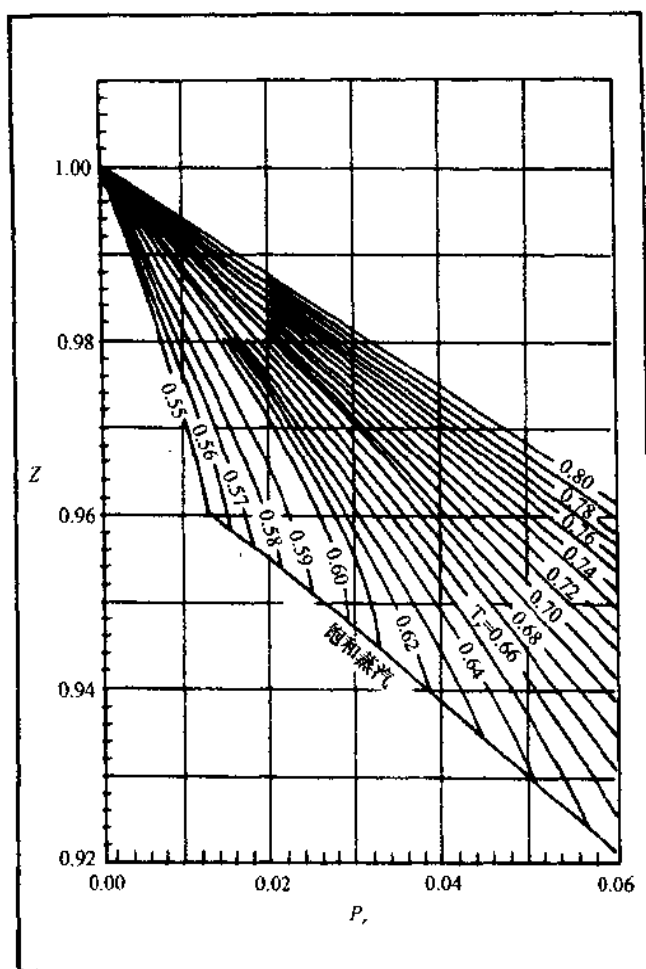


图 E2 压缩系数图

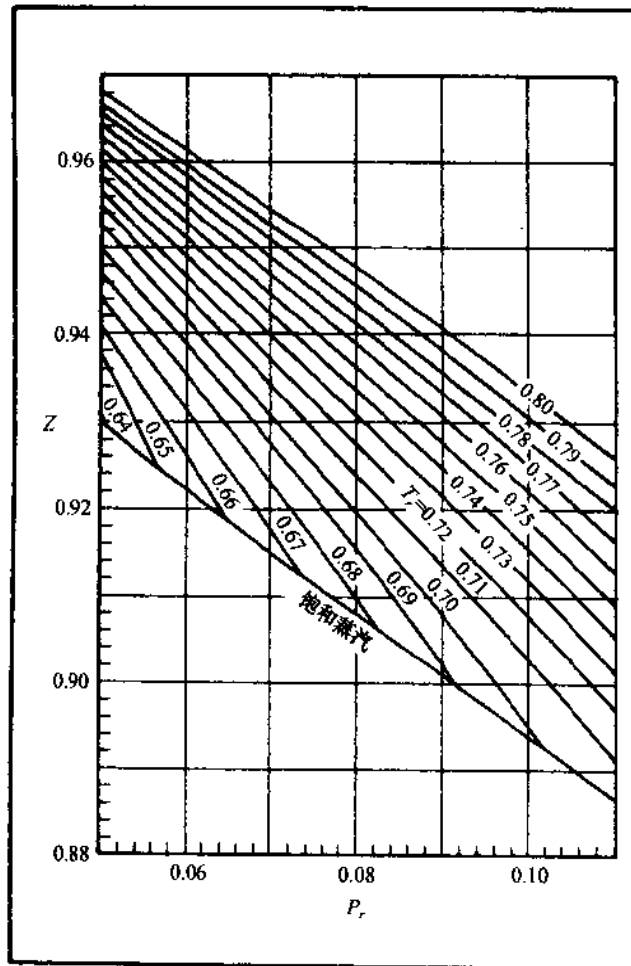
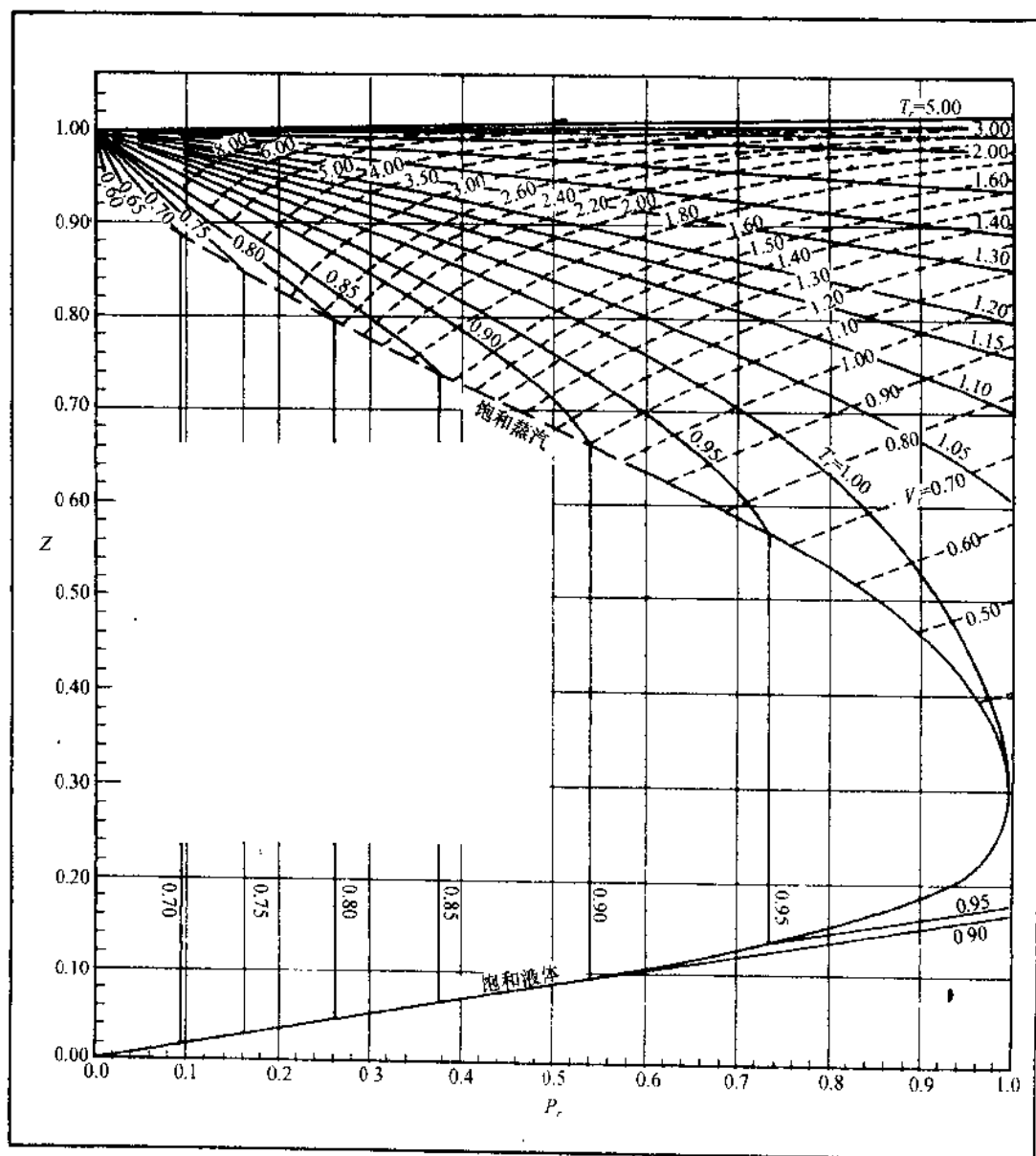


图 E3



附录 F 湿度表和湿度图

表 F1	有用的公式和方程
表 F2	饱和蒸汽压、饱和液体的比焓、饱和蒸汽的比焓、干空气的含湿量、比焓随温度的变化——USCS 制
表 F3	饱和蒸汽压、饱和液体的比焓、饱和蒸汽的比焓、干空气的含湿量、比焓随温度的变化——SI 制
表 F4	“Carrier”在海平面上的湿度图——USCS 制
表 F5	“Carrier”在海平面上的湿度图——SI 制

表 F1

(1) 道尔顿定律: $P = P_a + P_v$, 式中 P = 总压, P_a = 空气的分压, P_v = 水蒸气的分压。

(2) 含湿量(比湿度): $\omega = m_v / m_a \approx 0.6220 (P_v / P_a)$

因此

$$P_v = \frac{\omega P}{\omega + 0.6220}$$

(3) 相对湿度: $\phi = P_v / P_g = P_a \omega / 0.6220 P_g$, 式中蒸汽压 P_v 和饱和蒸汽压 P_g 为干球温度 (T_d) 下的值。

(4) 饱和度:

$$\mu = \phi \frac{P - P_g}{P - P_v} = \phi - \frac{\omega}{0.6220} (1 - \phi)$$

(5) 绝热饱和方程: $\omega = \frac{c_p (T_w - T_d) + \omega_d h_{fgw}}{h_{gd} - h_{fw}}$, 下标 d = 干球(未饱和)状态; w = 湿球(饱和)状态; c_p = 干空气的比热。

(6) Carrier 方程:

$$P_v = P_{gw} - \frac{(P - P_{gw})(T_d - T_w)}{A - BT_w}$$

式中 P_{gw} 为湿球温度下的饱和蒸汽压。

在 USCS 单位制下: P 的单位是 psia, T 的单位是 °F, $A = 2800^\circ\text{F}$, $B = 1.3$ 。

在 SI 单位制下: P 的单位是 bar, T 的单位是 °C, $A = 1555.6^\circ\text{C}$, $B = 0.7222$ 。

(7) 空气-水蒸气混合物的经验公式:

$$h_a (\text{kJ/kg}) \approx 1.006 [T(^{\circ}\text{C})]$$

$$h_a (\text{Btu/lbm}) \approx 0.24027 [T(^{\circ}\text{F})]$$

$$h_f (\text{kJ/kg}) \approx 4.190 [T(^{\circ}\text{C})]$$

$$h_f (\text{Btu/lbm}) \approx [T(^{\circ}\text{F})] - 31.9$$

$$h_g (\text{kJ/kg}) \approx 2501 + 1.83 [T(^{\circ}\text{C})]$$

$$h_g (\text{Btu/lbm}) \approx 1601.7 + 0.43667 [T(^{\circ}\text{F})]$$

$$\ln[P_g (\text{bar})] \approx 14.43509 - \frac{5333.3}{T(\text{K})}$$

$$\ln[P_g (\text{psia})] \approx 17.01523 - \frac{9549.5}{T(^{\circ}\text{R})}$$

$$\ln[P_g (\text{bar})] \approx 12.19286 - \frac{4109.1}{[T(\text{K})] - 35.50}$$

$$\ln[P_g (\text{psia})] \approx 14.97156 - \frac{7490.8}{[T(^{\circ}\text{R})] - 61.05}$$

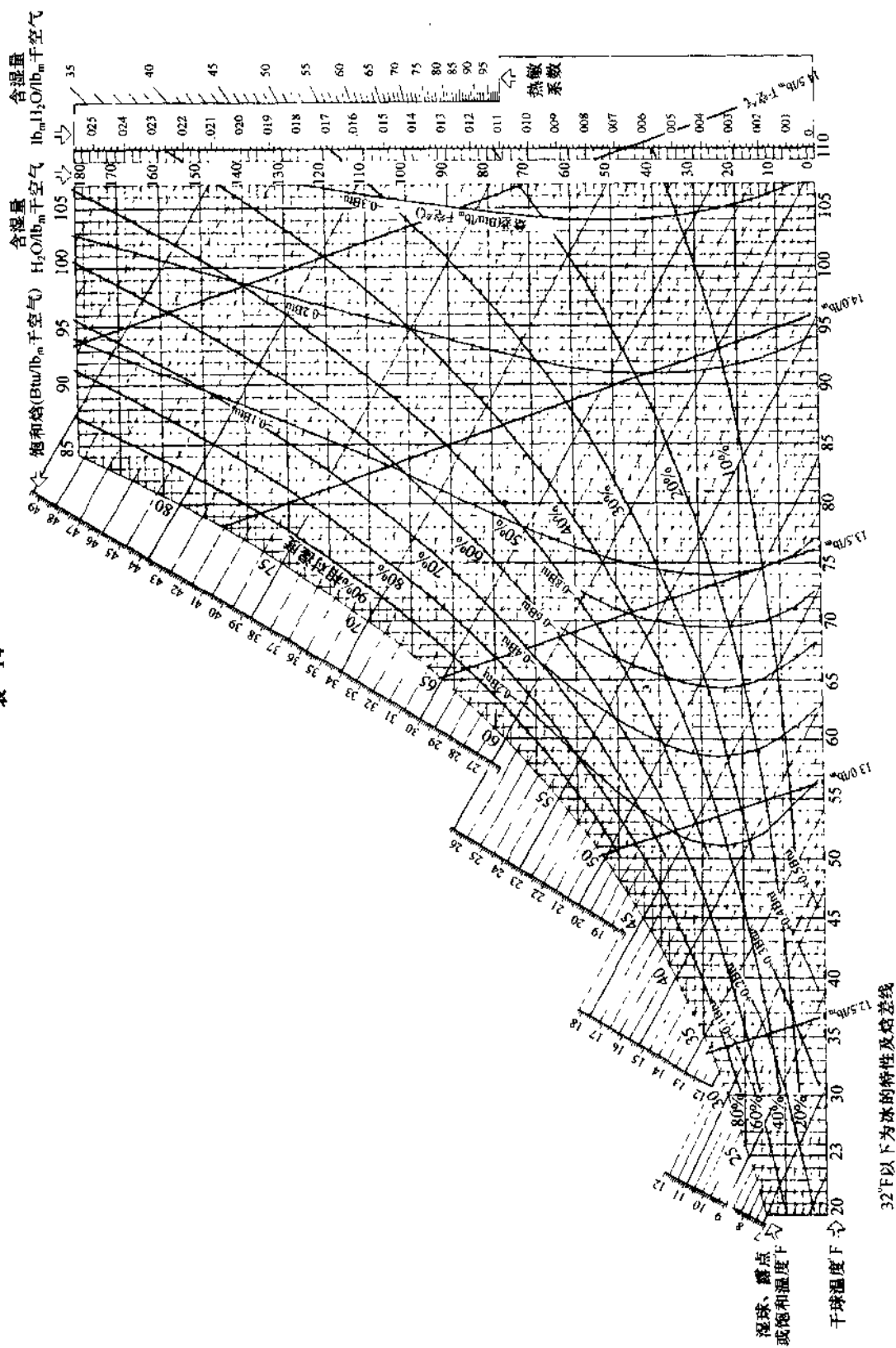
表 F2

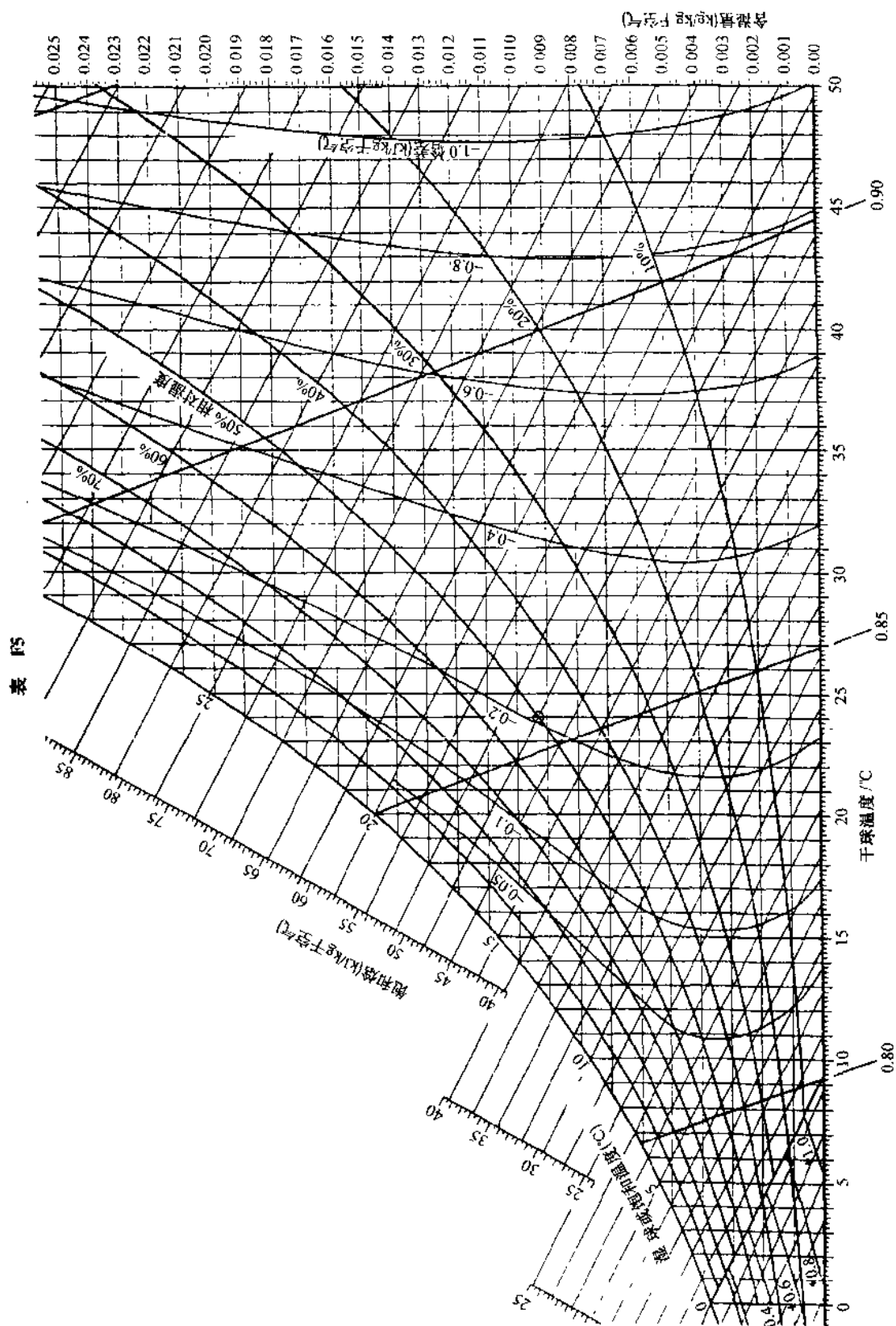
T /°F	P_s /psia	h_f /(Btu/lb _m)	h_g /(Btu/lb _m)	ω_g /(lb _m H ₂ O/lb _m da)	h_a /(Btu/lb _m)	T /°F	P_s /psia	h_f /(Btu/lb _m)	h_g /(Btu/lb _m)	ω_g /(lb _m H ₂ O/lb _m da)	h_a /(Btu/lb _m)
32	0.08865	0.0	1075.1	0.00377	7.687	70	0.36329	38.1	1091.8	0.01577	16.818
33	0.09229	1.0	1075.6	0.00393	7.927	71	0.37587	39.1	1092.2	0.01633	17.058
34	0.09607	2.0	1076.0	0.00409	8.168	72	0.38883	40.1	1092.6	0.01690	17.299
35	0.09986	3.0	1076.5	0.00426	8.408	73	0.40217	41.1	1093.1	0.01750	17.539
36	0.10403	4.0	1076.9	0.00443	8.648	74	0.41593	42.1	1093.5	0.01812	17.779
37	0.10823	5.0	1077.3	0.00461	8.888	75	0.43009	43.1	1093.9	0.01875	18.020
38	0.11257	6.0	1077.8	0.00480	9.129	76	0.44466	44.1	1094.4	0.01941	18.260
39	0.11707	7.0	1078.2	0.00499	9.369	77	0.45967	45.1	1094.8	0.02008	18.501
40	0.12173	8.0	1078.7	0.00520	9.609	78	0.47511	46.1	1095.2	0.02078	18.741
41	0.12655	9.0	1079.1	0.00540	9.849	79	0.49100	47.1	1095.7	0.02150	18.981
42	0.13153	10.0	1079.5	0.00562	10.090	80	0.50737	48.1	1096.1	0.02222	19.222
43	0.13669	11.0	1080.0	0.00584	10.330	81	0.52420	49.1	1096.5	0.02301	19.462
44	0.14203	12.0	1080.4	0.00607	10.570	82	0.54150	50.1	1097.0	0.02380	19.703
45	0.14755	13.1	1080.8	0.00631	10.810	83	0.55933	51.1	1097.4	0.02461	19.943
46	0.15327	14.1	1081.3	0.00656	11.050	84	0.57763	52.1	1097.8	0.02545	20.183
47	0.15917	15.1	1081.7	0.00681	11.291	85	0.59648	53.1	1098.2	0.02631	20.424
48	0.16528	16.1	1082.2	0.00708	11.531	86	0.61585	54.1	1098.7	0.02721	20.664
49	0.17159	17.1	1082.6	0.00735	11.771	87	0.63576	55.1	1099.1	0.02813	20.905
50	0.17811	18.1	1083.0	0.00763	12.012	88	0.65625	56.1	1099.5	0.02907	21.145
51	0.18485	19.1	1083.5	0.00792	12.252	89	0.67726	57.0	1100.0	0.03005	21.385
52	0.19181	20.1	1083.9	0.00823	12.492	90	0.69890	58.0	1100.4	0.03106	21.625
53	0.19900	21.1	1084.3	0.00854	12.732	91	0.72113	59.0	1100.8	0.03210	21.866
54	0.20643	22.1	1084.8	0.00886	12.973	92	0.74395	60.0	1101.3	0.03317	22.107
55	0.21410	23.1	1085.2	0.00920	13.213	93	0.76742	61.0	1101.7	0.03427	22.347
56	0.22203	24.1	1085.7	0.00954	13.453	94	0.79151	62.0	1102.1	0.03541	22.588
57	0.23020	25.1	1086.1	0.00990	13.694	95	0.81628	63.0	1102.6	0.03658	22.828
58	0.23865	26.1	1086.5	0.01027	13.934	96	0.84170	64.0	1103.0	0.03779	23.069
59	0.24736	27.1	1087.0	0.01065	14.174	97	0.86779	65.0	1103.4	0.03903	23.309
60	0.25635	28.1	1087.4	0.01104	14.415	98	0.89459	66.0	1103.8	0.04032	23.550
61	0.26563	29.1	1087.8	0.01145	14.655	99	0.92211	67.0	1104.3	0.04164	23.790
62	0.27520	30.1	1088.3	0.01187	14.895	100	0.95034	68.0	1104.7	0.04300	24.031
63	0.28507	31.1	1088.7	0.01230	15.136						
64	0.29525	32.1	1089.1	0.01275	15.376						
65	0.30575	33.1	1089.6	0.01322	15.616						
66	0.31657	34.1	1090.0	0.01369	15.857						
67	0.32772	35.1	1090.4	0.01419	16.097						
68	0.33922	36.1	1090.9	0.01470	16.337						
69	0.35107	37.1	1091.3	0.01522	16.578						

表 F3

T /°C	P_g /bar	h_f /(kJ/kg)	h_g /(kJ/kg)	ω_g /(kgH ₂ O/kg da)	h_a /(kJ/kg)
0.01	0.006117	0.0	2500.5	0.00379	0.000
1	0.006572	4.2	2502.4	0.00408	1.006
2	0.007061	8.4	2504.2	0.00438	2.012
3	0.007581	12.6	2506.0	0.00471	3.018
4	0.008136	16.8	2507.9	0.00505	4.024
5	0.008726	21.0	2509.7	0.00542	5.029
6	0.009354	25.2	2511.5	0.00582	6.036
7	0.010021	29.4	2513.4	0.00624	7.041
8	0.010730	33.6	2515.2	0.00668	8.047
9	0.011483	37.8	2517.1	0.00715	9.053
10	0.012281	42.0	2518.9	0.00766	10.059
11	0.013129	46.2	2520.7	0.00820	11.065
12	0.014027	50.4	2522.6	0.00877	12.071
13	0.014979	54.6	2524.4	0.00937	13.077
14	0.015988	58.7	2526.2	0.01001	14.084
15	0.017056	62.9	2528.0	0.01069	15.090
16	0.018085	67.1	2529.9	0.01141	16.096
17	0.019380	71.3	2531.7	0.01218	17.102
18	0.020644	75.5	2533.5	0.01299	18.108
19	0.021979	79.7	2535.3	0.01385	19.114
20	0.023388	83.8	2537.2	0.01476	20.121
21	0.024877	88.0	2539.0	0.01572	21.127
22	0.026447	92.2	2540.8	0.01674	22.133
23	0.028104	96.4	2542.6	0.01782	23.140
24	0.029850	100.6	2544.5	0.01896	24.146
25	0.031691	104.8	2546.3	0.02017	25.153
26	0.033629	108.9	2548.1	0.02145	26.159
27	0.035670	113.1	2549.9	0.02280	27.165
28	0.037818	117.3	2551.7	0.02423	28.172
29	0.040078	121.5	2553.5	0.02574	29.179
30	0.042455	125.7	2555.3	0.02733	30.185
31	0.044953	129.9	2557.1	0.02901	31.192
32	0.047578	134.0	2559.0	0.03079	32.198
33	0.050335	138.2	2560.8	0.03267	33.205
34	0.053229	142.4	2562.6	0.03466	34.212
35	0.056267	146.6	2564.4	0.03676	35.219
36	0.059454	150.8	2566.2	0.03897	36.226
37	0.062795	155.0	2568.0	0.04131	37.233
38	0.066298	159.1	2569.8	0.04378	38.239
39	0.069969	163.3	2571.6	0.04639	39.246
40	0.073814	167.5	2573.4	0.04914	40.253
41	0.077840	171.7	2575.2	0.05205	41.261
42	0.082054	175.9	2576.9	0.05512	42.268
43	0.086464	180.1	2578.7	0.05837	43.275
44	0.091076	184.2	2580.5	0.06179	44.282
45	0.095898	188.4	2582.3	0.06541	45.289
46	0.100938	192.6	2584.1	0.06924	46.296
47	0.106205	196.8	2585.9	0.07328	47.304
48	0.111706	201.0	2587.6	0.07756	48.311
49	0.117449	205.1	2589.4	0.08208	49.319
50	0.123434	209.3	2591.2	0.08686	50.326

表 F4





附录 G 热化学表

- 表 G1 基于 AMU(任意质量单位,即无量纲)的当量空气需要量
- 表 G2 标准生成焓——SI 制(1.013bar, 298.15K)和 USCS 制(14.696psia, 536.67°R)
[部分最初发表于机械工程师手册(M. Kutz 编),版权属 John Wiley and Sons 公司,由版权拥有者 John Wiley and Sons 公司授权重印。]
- 表 G3 半完全气体的显焓(Btu/lb_m mole)随温度的变化(°R)
- 表 G4 半完全气体的显焓(kJ/kmol)随温度的变化(K)[最初发表于机械工程师手册(M. Kutz 编),版权属 John Wiley and Sons 公司。由版权拥有者 John Wiley and Sons 公司授权重印。]

表 G1

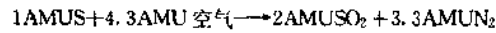
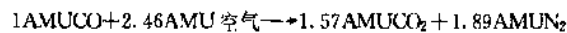
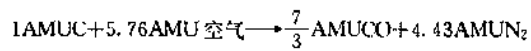
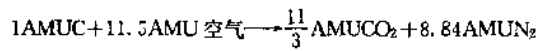
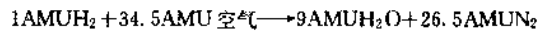


表 G2

物质	分子式	ΔH_f° /(kJ/kmol)	ΔH_f° /(Btu/lbmole)
乙醛	C ₂ H ₄ O(g)	-166 000	-71 370
醋酸	C ₂ H ₄ O ₂ (g)	-436 200	-187 530
丙酮	C ₃ H ₆ O(l)	-248 000	-106 620
乙炔	C ₂ H ₂ (g)	+226 740	+97 480
氨	NH ₃ (g)	-46 190	-19 850
苯胺	C ₆ H ₇ N(l)	+35 300	+15 180
苯	C ₆ H ₆ (l)	+49 030	+21 080
丁醇	C ₄ H ₁₀ O(l)	-332 400	-142 910
丁烷, n	C ₄ H ₁₀ (l)	-105 900	-45 530
丁烷, n	C ₄ H ₁₀ (g)	-126 200	-54 260
丁烷, i	C ₄ H ₁₀ (g)	-134 500	-57 825
二氧化碳	CO ₂ (g)	-393 510	-169 200
二硫化碳	CS ₂ (g)	-109 200	-46 950
一氧化碳	CO(g)	-110 520	-47 520
四氯化碳	CCl ₄ (g)	-103 000	-44 300
四氟化碳	CF ₄ (g)	-921 300	-396 090
三氯甲烷	CHCl ₃ (g)	-104 000	-44 710
环己烷	C ₆ H ₁₂ (g)	-123 100	-52 920
环丙烷	C ₃ H ₆ (g)	+53 300	+22 910
癸烷, n	C ₁₀ H ₂₂ (l)	-332 600	-143 000
联苯	C ₁₂ H ₁₀ (g)	-172 800	-74 290
乙烷	C ₂ H ₆ (g)	-84 670	-36 400
乙醇	C ₂ H ₅ O(g)	-235 200	-101 130
乙醇	C ₂ H ₅ O(l)	-277 600	-119 350
醋酸乙醇	C ₄ H ₈ O ₂ (g)	-432 700	-186 030
氯乙烷	C ₂ H ₅ Cl(g)	-107 600	-46 260
乙醚	C ₄ H ₁₀ O(g)	-250 800	-107 830
乙烯	C ₂ H ₄ (g)	+52 280	+22 480
二乙醚	C ₂ H ₄ O(g)	-38 500	-16 550
庚烷	C ₇ H ₁₆ (g)	-187 800	-80 740

物质	分子式	ΔH_f° /(kJ/kmol)	ΔH_f° /(Btu/lbmole)
乙烷	C ₂ H ₆ (g)	-167 250	-71 900
肼(联氨)	N ₂ H ₄ (l)	-50 600	-21 750
肼(联氨)	N ₂ H ₄ (g)	+95 400	+41 000
过氧化氢	H ₂ O ₂ (l)	-187 500	-80 610
甲烷	CH ₄ (g)	-74 840	-32 180
甲醇	CH ₃ O(l)	-238 600	-102 600
甲醇	CH ₃ O(g)	-200 900	-86 390
甲基醋酸	C ₃ H ₆ O ₂ (l)	-444 300	-191 000
溴化甲烷	CH ₃ Br(g)	-36 200	-15 560
氯甲烷	CH ₃ Cl(g)	-86 300	-37 100
甲基甲酸	C ₂ H ₄ O ₂ (g)	-335 100	-144 000
亚甲基氯	CH ₂ Cl ₂ (g)	-94 000	-40 400
萘	C ₁₀ H ₈ (g)	-151 500	-65 130
一氧化氮	NO(g)	+90 300	+38 820
二氧化氮	NO ₂ (g)	+33 300	+14 320
氧化亚氮	N ₂ O(g)	+82 000	+35 250
辛烷	C ₈ H ₁₈ (l)	-250 000	-107 490
辛烷	C ₈ H ₁₈ (g)	-208 400	-89 600
戊烷, i	C ₅ H ₁₂ (g)	-154 500	-66 420
戊烷, n	C ₅ H ₁₂ (g)	-146 400	-62 940
丙烷	C ₃ H ₈ (g)	-103 800	-44 630
丙醇	C ₃ H ₈ (g)	-258 800	-111 300
丙烯	C ₃ H ₆ (g)	+20 400	+8 770
R11	CFC1 ₃ (g)	-284 500	-122 300
R12	OC1 ₂ F ₂ (g)	-468 600	-201 460
R13	OC1F ₃ (g)	-715 500	-306 750
R13B1	CF ₃ Br(g)	-642 700	-276 310
R23	CHF ₃ (g)	-682 000	-293 200
二氧化硫	SO ₂ (g)	-296 900	-127 640
六氟化硫	SF ₆ (g)	-1 207 900	-519 300
甲苯	C ₇ H ₈ (g)	-50 000	-21 500
水	H ₂ O(l)	-285 830	-122 890
水	H ₂ O(g)	-241 820	-104 000

表 G3

T/°R	物 质							
	CO	CO ₂	H ₂ O(g)	NO	NO ₂	N ₂	O ₂	SO ₂
400	-948	-1153	-1094	-980	-504	-953	-956	-1258
450	-601	-745	-696	-623	-751	-601	-608	-811
500	-253	-321	-296	-264	-322	-257	-259	-347
550	95	119	105	95	118	90	91	129
600	443	573	507	451	567	438	443	614
650	792	1043	911	808	1027	787	797	1113
700	1141	1525	1317	1165	1670	1135	1154	1807
750	1492	2019	1727	1522	1979	1485	1514	2140
800	1843	2525	2139	1883	2470	1835	1877	2672
850	2196	3043	2554	2139	2972	2186	2243	3214
900	2551	3570	2973	2604	3482	2539	2613	3761
950	2908	4108	3395	2970	4007	2893	2986	4342
1000	3267	4655	3821	3337	4534	3248	3362	4919
1100	3992	5775	4684	4082	5619	3966	4125	6059
1200	4726	6928	5562	4837	6735	4691	4901	7248
1300	5470	8109	6457	5594	7879	5424	5688	8472
1400	6223	9317	7367	6368	9047	6167	6485	9707
1500	6986	10549	8293	7158	10235	6919	7292	10963
1600	7758	11802	9237	7950	11443	7680	8107	12225
1700	8539	13074	10137	8829	12664	8449	8931	13500
1800	9328	14364	11175	9557	13904	9227	9761	14802
1900	10125	15671	12170	10374	15153	10012	10597	16115
2000	10928	16990	13180	11195	16420	10805	11439	17425
2200	12718	19670	15255	12855	18960	12410	13140	20080
2400	14202	22400	17390	14535	21570	14040	14765	22770
2600	15869	25160	19580	16230	24180	15685	16585	25470
2800	17551	27960	21830	17935	26820	17350	18330	28190
3000	19250	30780	24130	19655	29480	19030	20090	30940
3200	20950	33630	26470	21390	32150	20730	21870	33690
3400	22670	36500	28860	22970	34580	22430	23650	36210
3600	24400	39380	31280	24880	37510	24150	25450	39230
3800	26140	42290	33740	26630	40210	25870	27260	42020
4000	27880	45200	36230	28390	42920	27600	29080	44810
4200	29630	48130	38750	30160	45640	29340	30910	47330
4400	31380	51080	41300	31930	48360	31080	32760	50420
4600	33144	54030	43870	33700	51080	32830	34620	53240
4800	34910	57000	46460	35480	53810	34590	36480	56060
5000	36680	59970	49070	37260	56550	36350	38360	59090

表 G4

T/K	物 质							
	CO	CO ₂	H ₂ O(g)	NO	NO ₂	N ₂	O ₂	SO ₂
200	-2858	-3414	-3280	-2950	-3494	-2855	-2860	-3736
220	-2276	-2757	-2613	-2345	-2803	-2270	-2279	-3008
240	-1692	-2080	-1945	-1749	-2102	-1685	-1698	-2266
260	-1110	-1384	-1277	-1148	-1390	-1105	-1113	-1508
280	-529	-667	-608	-547	-668	-525	-529	-719
300	54	67	63	54	67	55	60	75
320	638	822	736	652	813	636	650	882
340	1221	1594	1411	1248	1573	1217	1238	1702
360	1805	2383	2088	1847	2344	1800	1832	2541
380	2389	3187	2768	2444	3130	2383	2429	3387
400	2975	4008	3452	3042	3929	2967	3029	4251
420	3562	4841	4138	3641	4739	3554	3633	5123
440	4152	5689	4828	4247	5560	4147	4241	6014
460	4642	6550	5522	4849	6395	4737	4853	6923
480	5334	7424	6221	5054	7243	5329	5468	7827
500	5929	8314	6920	6058	8100	5921	6088	8749
550	7427	10580	8695	7589	10295	7401	7655	11180
600	8941	12915	10500	9146	12555	8902	9247	13545
650	10475	15310	12325	10720	14875	10415	10865	16015
700	12020	17760	14185	12310	17250	11945	12500	18550
750	13590	20270	16075	13890	19675	13490	14160	21150
800	15175	22820	17990	15550	22140	15050	15840	23720
850	16780	25410	19945	17200	24640	16630	17535	26390
900	18400	28040	21920	18860	27180	18220	19245	29020
950	20030	30700	23940	20540	29740	19835	20970	31700
1000	21690	33410	25980	22230	32340	21460	22170	34430
1050	23350	36140	28060	23940	34950	23100	24460	37180
1100	25030	38890	30170	25650	37610	24750	26180	39920
1150	26720	41680	32310	27380	40260	26430	27990	42690
1200	28430	44480	34480	29120	42950	28110	29770	45460

表 G4(续)

T/K	物 质							
	CO	CO ₂	H ₂ O(g)	NO	NO ₂	N ₂	O ₂	SO ₂
1250	30140	47130	36680	30870	45650	29810	31560	48270
1300	31870	50160	38900	32630	48350	31510	33350	51070
1350	33600	53030	41130	34400	51090	33220	35160	53900
1400	35340	55910	43450	36170	53810	34940	36970	56720
1450	37090	58810	45770	37950	56560	36670	38790	59560
1500	38850	61710	48100	39730	59310	38410	40610	62400
1550	40610	64800	50460	41520	62070	40160	42440	65260
1600	42380	67580	52840	43320	64850	41910	44280	68120
1650	44156	70530	55240	45120	67640	43670	46120	71000
1700	45940	73490	57680	46930	70420	45440	47970	73870
1750	47727	76460	60130	48740	73220	47210	49830	76760
1800	49520	79440	62610	50560	76010	49000	51690	79640
1850	51320	82430	65100	52380	78810	50780	53560	82540
1900	53120	85430	67610	54200	81630	52570	55440	85440
1950	54930	88440	70140	56020	84450	54370	57310	88350
2000	56740	91450	72690	57860	87260	56160	59200	91250
2100	60380	97500	77830	61530	92910	59760	62990	97080
2200	64020	103570	83040	65220	98580	63380	66800	102930
2300	67680	109670	88290	68910	104260	67010	70630	108790
2400	71350	115790	93600	72610	109950	70660	74490	114670
2500	75020	121930	98960	76320	115650	74320	78370	120560
2600	78710	128080	104370	80040	121360	77990	82270	126460
2700	82410	134260	109810	83760	127080	81660	86200	132380
2800	86120	140440	115290	87490	132800	85360	90140	138300
2900	89830	146650	120810	91230	138540	89050	94110	144240
3000	93540	152860	126360	94980	144270	92750	98100	150180

附录 H 几种随温度变化的气体分解的平衡常数

表 H1 $\log_{10} K_p$ 随 $T(K)$ 的变化 [以 McGraw-Hill 出版公司, 热力学第 5 版 (1988) 表 A-32M 推导得.]

表 H2 $\log_{10} K_p$ 随 $T(^{\circ}R)$ 的变化 [从表 H1 推导得.]

表 H1

温度 /K	$H_2 \rightleftharpoons 2H$	$O_2 \rightleftharpoons 2O$	$N_2 \rightleftharpoons 2N$	$\frac{1}{2}O_2 + \frac{1}{2}N_2 \rightleftharpoons NO$	$H_2O \rightleftharpoons H_2 + \frac{1}{2}O_2$	$H_2O \rightleftharpoons OH + \frac{1}{2}H_2$	$CO_2 \rightleftharpoons CO + \frac{1}{2}O_2$	$CO_2 + H_2 \rightleftharpoons CO + H_2O$
298	-71.224	-81.208	-159.600	-15.171	-40.048	-46.054	-45.066	-5.018
500	-40.316	-45.880	-92.672	-8.783	-22.886	-26.130	-25.025	-2.139
1000	-17.292	-19.614	-43.056	-4.062	-10.062	-11.280	-10.221	-0.159
1200	-13.414	-15.208	-34.754	-3.275	-7.899	-8.789	-7.764	+0.135
1400	-10.630	-12.054	-28.812	-2.712	-6.347	-7.003	-6.014	+0.333
1600	-8.532	-9.684	-24.350	-2.290	-5.180	-5.662	-4.706	+0.474
1700	-7.666	-8.706	-22.512	-2.116	-4.699	-5.109	-4.169	+0.530
1800	-6.896	-7.836	-20.874	-1.962	-4.270	-4.617	-3.693	+0.577
1900	-6.204	-7.058	-19.410	-1.823	-3.886	-4.177	-3.267	+0.619
2000	-5.580	-6.356	-18.092	-1.699	-3.540	-3.780	-2.884	+0.656
2100	-5.016	-5.720	-16.898	-1.586	-3.227	-3.422	-2.539	+0.688
2200	-4.502	-5.142	-15.810	-1.484	-2.942	-3.095	-2.226	+0.716
2300	-4.032	-4.614	-14.818	-1.391	-2.682	-2.798	-1.940	+0.742
2400	-3.600	-4.130	-13.908	-1.305	-2.443	-2.525	-1.679	+0.764
2500	-3.202	-3.684	-13.070	-1.227	-2.224	-2.274	-1.440	+0.784
2600	-2.836	-3.272	-12.298	-1.154	-2.021	-2.042	-1.219	+0.802
2700	-2.494	-2.892	-11.580	-1.087	-1.833	-1.828	-1.015	+0.818
2800	-2.178	-2.536	-10.914	-1.025	-1.658	-1.628	-0.825	+0.833
2900	-1.882	-2.206	-10.294	-0.967	-1.495	-1.442	-0.649	+0.846
3000	-1.606	-1.898	-9.716	-0.913	-1.343	-1.269	-0.485	+0.858
3100	-1.348	-1.610	-9.174	-0.863	-1.201	-1.107	-0.332	+0.869
3200	-1.106	-1.340	-8.664	-0.815	-1.067	-0.955	-0.189	+0.878
3300	-0.878	-1.086	-8.186	-0.771	-0.942	-0.813	-0.054	+0.888
3400	-0.664	-0.846	-7.736	-0.729	-0.824	-0.679	+0.071	+0.895
3500	-0.462	-0.620	-7.312	-0.690	-0.712	-0.552	+0.190	+0.902

来源: 基于 JANAF 表 NSRDS-NBS-37 上的数据。

表 H2

温度 /°R	$\text{H}_2=2\text{H}$	$\text{O}_2=2\text{O}$	$\text{N}_2=2\text{N}$	$\frac{1}{2}\text{O}_2+\frac{1}{2}\text{N}_2$ = NO	$\text{H}_2\text{O}=\text{H}_2+\frac{1}{2}\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}=\text{OH}+\frac{1}{2}\text{H}_2$	$\text{CO}_2=\text{CO}+\frac{1}{2}\text{O}_2$	CO_2+H_2 = $\text{CO}+\text{H}_2\text{O}$
500	-76.838	-87.625	-171.757	-16.331	-43.165	-49.673	-48.706	-5.541
1000	-35.711	-40.627	-82.749	7.831	-20.321	-23.160	-22.064	-1.743
1500	-21.897	-24.867	-52.979	-5.005	-12.627	-14.250	-13.182	-0.555
2000	-15.353	-16.970	-38.075	3.593	-8.764	-9.799	-8.747	-0.017
2500	-10.764	-12.205	-29.097	-2.739	-6.421	-7.465	-6.098	0.323
3000	-7.943	-9.019	-23.100	-2.172	-4.853	-5.301	-4.341	0.512
3500	-5.919	-6.737	-18.807	-1.766	-3.728	-4.001	-3.092	0.636
4000	-4.394	-5.021	-15.582	-1.463	-2.882	-3.026	-2.160	0.722
4500	-3.202	-3.684	-13.070	-1.227	-2.224	-2.270	-1.440	0.784
5500	-2.246	-2.613	-11.058	-1.038	-1.696	-1.667	-0.866	0.830
5500	-1.461	-1.736	-9.411	-0.885	-1.263	-1.174	-0.399	0.864
6000	-0.805	-1.004	-8.033	0.757	-0.902	-0.763	-0.012	0.890